



## **AUTOREFERAT**

Wynikający z art. 13 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

mgr inż. Bartosz Ciupek

Tytuł rozprawy doktorskiej:

### **ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY PROCESU SPALANIA PALIW STAŁYCH W KOTŁACH MAŁEJ MOCY PRZY WYKORZYSTANIU PARY WODNEJ**

Promotor:

dr hab. inż. Rafał Urbaniak

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Damian Joachimiak

Poznań 2021

## SPIS TREŚCI

<b>1. Dane osobowe .....</b>	<b>2</b>
1.1 Imię i nazwisko .....	2
1.2 Aktualne miejsce zatrudnienia .....	2
1.3 Stanowisko .....	2
1.4 Obszar zainteresowań naukowych .....	2
<b>2. Posiadane dyplomy, tytuły zawodowe, odbyte szkolenia.....</b>	<b>3</b>
2.1 Posiadane dyplomy oraz stopnie zawodowe .....	3
2.2 Odbyte szkolenia.....	3
<b>3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Wskazanie osiągnięć naukowych wchodzących w skład dysertacji.....</b>	<b>5</b>
4.1 Tytuł rozprawy doktorskiej .....	5
4.2 Zestawienie prac naukowych stanowiących rozprawę doktorską .....	5
4.3 Streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim .....	8
<b>5. Uzasadnienie podjętej tematyki oraz wprowadzenie.....</b>	<b>10</b>
<b>6. Określenie problemu badawczego, tezy oraz zadań badawczych.....</b>	<b>14</b>
6.1 Główny problem badawczy.....	14
6.2 Teza badawcza .....	14
6.3 Zadania badawcze .....	14
<b>7. Metody badawcze wykorzystane do realizacji rozprawy doktorskiej.....</b>	<b>15</b>
7.1 Obiekty badawcze oraz program realizacji badań .....	15
7.2 Opis stanowiska badawczego i użytej aparatury pomiarowej .....	16
7.3 Paliwo użyte do badań .....	19
7.4 Układ wytwarzania pary wodnej.....	20
7.4.1 Projekt układu wytwarzania pary wodnej .....	21
7.4.2 Określenie ciśnienia obliczeniowego .....	21
7.4.3 Temperatura obliczeniowa.....	22
7.4.4 Naprężenia dopuszczalne.....	22
7.4.5 Obliczenia momentu gnącego.....	23
7.4.6 Obliczania grubości ścianek zbiornika ciśnieniowego .....	23
7.4.7 Parametry eksploatacyjne urządzenia .....	24
7.4.8 Dobór grzałki elektrycznej.....	25
7.4.9 Finalny model parownicy .....	25
<b>8. Wyniki badań wykorzystane do realizacji rozprawy doktorskiej .....</b>	<b>28</b>
8.1 Badania i analiza zmian jakości procesu spalania pod wpływ doprowadzonej pary wodnej do kotła EKO 15 .....	28
8.2 Badania i analiza zmian jakości procesu spalania pod wpływ doprowadzonej pary wodnej do kotła KN-20.....	33
<b>9. Wnioski końcowe.....</b>	<b>42</b>
<b>10. Syntetyczne ujęcie wkładu w rozwój dyscypliny naukowej: budowa i eksploatacja maszyn – inżynieria mechaniczna.....</b>	<b>44</b>
<b>11. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych .....</b>	<b>45</b>
11.1 Współpraca z krajowymi ośrodkami naukowymi oraz przedstawicielami przemysłu .....	45
11.2 Zgłoszenia patentowe.....	46
11.3 Projekty i prace zewnętrzne na rzecz przemysłu, ekspertyzy i opinie.....	47
11.4 Otrzymane nagrody oraz pełnione funkcje .....	49
11.5 Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne .....	50
<b>12. Zbiorcze zestawienie osiągnięć naukowych.....</b>	<b>52</b>

## **1. DANE OSOBOWE**

### **1.1 Imię i nazwisko**

Bartosz Ciupek

### **1.2 Aktualne miejsce zatrudnienia**

Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Instytut Energetyki Ciepłej  
Zakład Paliw i Energetyki Odnawialnej  
ul. Piotrowo 3, 61–138 Poznań

### **1.3 Stanowisko**

Asystent

### **1.4 Obszar zainteresowań naukowych**

- projektowanie urządzeń energetycznych w szczególności kotłów grzewczych niskotemperaturowych,
- prowadzenie badań eksperymentalnych w obszarze budowy i eksploatacji maszyn energetycznych,
- modelowanie i badanie procesu spalania paliwa stałych,
- budowa i optymalizacja układów badawczych do badań nad procesami spalania zachodzącymi w urządzeniach cieplnych,
- analiza zanieczyszczenia powietrza w aspekcie spalania paliw, mechanizmy ograniczenia i redukcji substancji szkodliwych pochodzących ze spalania paliw,
- analiza możliwości zastąpienia bądź eliminacji paliw kopalnych w kontekście dekarbonizacji procesów energetyczny.

## **2. POSIADANE DYPLOMY, TYTUŁY ZAWODOWE, ODBYTE SZKOLENIA**

### **2.1 Posiadane dyplomy oraz stopnie zawodowe**

#### **2016 – inżynier**

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu,

Kierunek: Transport, specjalność: Inżynieria Transportu Rurociągowego,

Tytuł pracy dyplomowej: *Termiczne zagospodarowanie biogazu z odpadów komunalnych – audyt energetyczny*

Promotor: dr inż. Ryszard Piątkowski

#### **2017 – magister inżynier**

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu,

Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Energetyka Ciepła,

Tytuł pracy dyplomowej: *Badanie wpływu rozdrobnienia paliw węglowych i zawartości wilgoci na emisje NO<sub>x</sub>*

Promotor: dr inż. Rafał Urbaniak

Kopię dyplomu nadania tytułu magistra inżyniera umieszczono w Załączniku 1.

### **2.2 Odbyte szkolenia**

**2016** – Szkolenie pt.: Rozwój technologii seryjnych silników spalinowych, szkolenie techniczne firmy MAHLE,

**2017** – Szkolenie pt.: Praktyczne publikowanie w otwartym dostępie, szkolenie realizowane przez Bibliotekę Politechniki Poznańskiej,

**2021** – Szkolenie pt.: Gaz w energetyce i ciepłownictwie, szkolenie realizowane przez BMP – budujemy możliwości porozumienia,

**2021** – Szkolenie pt.: Efektywność energetyczna w przemyśle spożywczym, szkolenie realizowane przez BMP – budujemy możliwości porozumienia,

**2021** – Szkolenie pt: Zarządzanie zadaniami w czasie, szkolenie realizowane przez Politechnikę Poznańską,

Kopie certyfikatów oraz zaświadczeń umieszczono w Załączniku 5.

### **3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH**

**02.03.2018 – 30.09.2019**

Politechnika Poznańska

Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Stanowisko: Starszy Referent Naukowo – Techniczny

Zakres obowiązków: realizacja projektu „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwa stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej” projekt aplikacyjny nr (05/52/NCBR/7281).

**01.10.2019 – obecnie**

Politechnika Poznańska

Instytut Energetyki Ciepłej,

Zakład Paliw i Energetyki Odnawialnej

Stanowisko: Asystent

Zakres obowiązków: nauczyciel akademicki w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, opiekun Laboratorium Procesów Konwersji Energii.

## 4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD DYSERTACJI

### 4.1 Tytuł rozprawy doktorskiej

Tytułem rozprawy doktorskiej wynikającym z art. 13 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) jest:

#### **Analiza możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej**

Na rozprawę doktorską składa się 12 wybranych publikacji, w tym: 7 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych wyróżnionych w Journal Citation Reports® indeksowanych w Thomson Reuters® Web of Science®, 1 publikacje w recenzowanych materiałach konferencyjnych indeksowanych w Thomson Reuters® Web of Science®, 4 publikacje w recenzowanym czasopiśmie naukowym wyszczególnionym na liście B wykazu czasopism opublikowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Web of Science® ResearcherID: AAF-3728-2019

Scopus® Author Identifier: 57203339388

Numer ORCID: 0000-0002-1943-6950

### 4.2 Zestawienie prac naukowych stanowiących rozprawę doktorską

1. **Ciupek B.**, Urbaniak R., Bartoszewicz J., 2018, *Emisja tlenku węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 3, T.49, s.90–94, DOI:10.15199/9.2018.3.2 [10 pkt (lista 2013–2016) – udział własny 40%],
2. **Ciupek B.**, 2018, *Możliwość obniżenia emisji substancji szkodliwych z kotła małej mocy przez współspalanie węgla kamiennego z biomasą nieдрzewną*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 7, T.49, s.257–260, DOI:10.15199/9.2018.7.2 [10 pkt (lista 2013–2016) – udział własny 100%],

3. **Ciupek B.**, 2018, *Wpływ zawirowania strugi spalin na obniżenie emisji pyłów oraz podniesienie sprawności cieplnej kotła peletowego*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 8, T.49, s.333–338, DOI:10.15199/9.2018.8.6 [10 pkt (lista 2013–2016) – udział własny 100%],
4. **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2018, *Optimization of the Retort Burner Construction to Reduce Emission of Harmful Substances*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 12, T.49, s.519–524, DOI:10.15199/9.2018.12.8 [10 pkt (lista 2013–2016) – udział własny 90%],
5. **Ciupek B.**, Bartoszewicz J., 2019, *The influence of geometry of primary air channels in standard retort burners on dust emission*, MATEC Web of Conferences, vol.254, s.04009–1–11, DOI:10.1051/matecconf/201925404009 [artykuł indeksowany w bazie Web of Science®, 5 pkt – udział własny 90%],
6. **Ciupek B.**, Janeba–Bartoszewicz E., Urbaniak R., 2019, *Wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny spalin*, Przemysł Chemiczny, nr 8, T.98 s.1283–1285, DOI:10.15199/62.2019.8.15 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 0,485, 40 pkt – udział własny 90%],
7. **Ciupek B.**, 2019, *Wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego na skład chemiczny spalin*, Przemysł Chemiczny, nr 11, T.98 s.1768–1772, DOI:10.15199/62.2019.11.15 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 0,485, 40 pkt – udział własny 100%],
8. Judt W., **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2020, *Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber*, Energy, vol.196, DOI:10.1016/j.energy.2020.117093 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 7,147, 200 pkt – udział własny 10%],
9. **Ciupek B.**, 2020, *Badanie procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych wyposażonych w parową komorę dopalania*, Przemysł Chemiczny, nr 8, T.99 s.1163–1168, DOI:10.15199/62.2020.8.9 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 0,464, 40 pkt – udział własny 100%],

10. Gołoś K., **Ciupek B.**, Judt W., Urbaniak R., 2021, *Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000-2020*, Przemysł Chemiczny, nr 5, T.100 s.486–489, DOI:10.15199/62.2021.5.9 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 0,464, 40 pkt – udział własny 65%],
11. **Ciupek B.**, Judt W., Gołoś K., Urbaniak R., 2021, *Analysis of low-power boilers work on real heat loads: A case of Poland*, Energies, vol.14, no.11, s.3101–1–13, DOI:10.3390/en14113101 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 3,004, 140 pkt – udział własny 75%],
12. **Ciupek B.**, Gołoś K., Jankowski R., Nadolny Z., 2021, *Effect of hard coal combustion in water steam environment on chemical composition of exhaust gases*, Energies, vol.14, no.20, s.6530–1–24, DOI:10.3390/en14206530 [czasopismo indeksowane w JCR, IF = 3,004, 140 pkt – udział własny 70%].

Kopie publikacji wraz z oświadczeniami autorów stanowiące osiągnięcie naukowe zamieszczono w Załączniku 2.

Spis literatury wykorzystanej do przygotowania dysertacji zamieszczono w Załączniku 3.



### 4.3 Streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim

#### Streszczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się z analizą możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach niskotemperaturowych poprzez dodanie dodatkowego czynnika termodynamicznego do procesu, w postaci pary wodnej. Zrealizowane prace mają charakter poznawczy oraz badawczy, a ich celem jest określenie wpływu dodania pary wodnej, na jakość procesu spalania oraz zbadanie czy zasadne jest stosowanie doprowadzenia pary wodnej do celów ograniczenia ilości emitowanych substancji szkodliwych z kotłów niskotemperaturowych zasilanych paliwami stałymi. W zrealizowanych badaniach pokazano wpływ dodania pary wodnej do procesu spalania węgla kamiennego na zmianę parametrów emisyjnych kotła. Analizując otrzymane z badań wyniki można zobaczyć, że para wodna dodana do procesu spalania węgla kamiennego znacząco wpłynęła na zmianę składu chemicznego spalin: spowodowała obniżenie stężeń masowych emitowanych pyłów (PM) oraz tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) przy jednoczesnym wzroście stężenia masowego emitowanego tlenku węgla (CO). Badania przeprowadzono na dwóch obiektach: kotle z automatycznym podawaniem paliwa wyposażonym w pojedynczą komorę spalania oraz kotle wyposażonym w komorę spalania wraz z znajdującą się nad nią komorą dopalania. Oprócz pomiaru stężeń masowych emitowanych substancji szkodliwych, mierzono temperaturę panującą w komorze spalania, dopalania, temperaturę spalin i zawartość tlenu w spalinach. Badania przeprowadzono dla kotła w trakcie pracy bez oraz z dodaniem pary wodnej do komory spalania lub dopalania z wydatkiem równym 0,71 kg/h lub 3,60 kg/h dla pracy kotłów z mocą minimalną (30%) i nominalną (100%). Do wytwarzania i wtryskiwania pary wodnej wykorzystano autorską wytwornicę pary o zakresie wytwarzania pary wodnej w zakresie od ok. 0,7 kg/h do ok. 3,6 kg/h. Na podstawie otrzymanych wyników wyliczono sprawność procesu spalania dla poszczególnej konfiguracji pracy danego kotła. Ostatnim aspektem praktycznym zrealizowanej pracy, który jednocześnie jest nowością wynikającą z zrealizowanych badań jest opracowanie algorytmu postępowania dla doprowadzenia pary wodnej do procesu spalania węgla kamiennego w kotle grzewczym do celu zminimalizowania ilości emitowanych substancji szkodliwych. Zrealizowane badania mają charakter aplikacyjny, co pozwala wdrożyć w rozwiązaniach handlowych opracowaną technologię.

## **Dissertation title**

### **Analysis of the possibility of improving the combustion process of solid fuels in low power boilers with the use of water steam**

## **Abstract**

The subject of the dissertation is related to the analysis of the possibility of improving the process of solid fuel combustion in low-temperature boilers by providing an additional thermodynamic factor to the process in the form of steam. The works carried out are of a cognitive and research character and their aim is to determine the impact of the supplied steam on the quality of the combustion process and to examine whether it is justified to use the supplied steam for the purpose of reducing the amount of harmful substances emitted from low power boilers fired with solid fuels. In the research carried out was shown the effect of introducing superheated steam into the hard coal combustion process on the change of boiler emission parameters. Analyzing the results obtained, it can be seen that the steam supplied to the hard coal combustion process significantly changed the chemical composition of flue gases: it caused a decrease in the mass concentration of emitted dust (PM) and nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) with a simultaneous increase in the mass concentration of emitted carbon monoxide (CO). Tests were carried out on two objects: a boiler with automatic fuel feeding equipped with a single combustion chamber and a boiler equipped with a combustion chamber with an afterburning chamber above it. Apart from the measurement of mass concentrations of emitted harmful substances, the temperature prevailing in the combustion chamber, afterburning chamber, flue gas temperature and flue gas oxygen content were measured. Tests were carried out for steam injection into the combustion chambers and afterburning chamber at the rate of 0.7 kg/h and 3.6 kg/h for boiler operation at minimum power (30%) and nominal power (100%). A proprietary steamer with a superheated steam generation range of 0.7 kg/h to 3.6 kg/h was used for steam generation and injection. Based on the results obtained, the efficiency of the combustion process was calculated for each configuration of boiler operation. The last practical aspect of the work, which at the same time is a novelty resulting from the completed research, is the development of a procedure algorithm for the supply of steam to the process of hard coal combustion in a heating boiler in order to minimize the amount of harmful substances emitted. The completed research has an applied character, which allows implementing the developed technology in commercial solutions.

## **5. UZASADNIENIE PODJĘTEJ TEMATYKI ORAZ WPROWADZENIE**

Na przestrzeni ostatnich lat problem jakości powietrza związany z procesami spalania paliw stałych w kotłach małej mocy jest coraz częściej poruszany w dyskusji naukowej. Kwestia ta wynika bezpośrednio z coraz większej świadomości społecznej, dotyczącej środowiska naturalnego oraz jakości powietrza. Na jakość powietrza zwłaszcza w okresie grzewczym największy wpływ ma sektor ogrzewnictwa indywidualnego. W Polsce udział ogrzewnictwa indywidualnego względem ciepła systemowego jest wysoki. Wynika to bezpośrednio z braku lub słabo rozwiniętej infrastruktury ogrzewania systemowego np. w systemie kogeneracji. W sektorze indywidualnym głównym źródłem ciepła są kotły grzewcze małej mocy spalające paliwa stałe. Popularność tych urządzeń wynika z ograniczonej dostępności do sieci gazowej oraz znacząco niższych cen paliw stałych i dedykowanym nim kotłom, względem urządzeń opalanych gazem. Na początku XXI wieku w Polsce nadal dużą popularnością cieszy się węgiel kamienny. Wynika to z faktu przyzwyczajenia użytkowników urządzeń grzewczych małej mocy oraz dostępności, łatwością magazynowania oraz ceną tego paliwa. Jakość procesu spalania w kotle grzewczym małej mocy wynika bezpośrednio z konstrukcji palnika lub paleniska oraz parametrów technicznych opału.

Badania nad nowoczesnymi technologiami obniżania emisji substancji szkodliwych z kotłów grzewczych na paliwa stałe są nadal poruszonym tematem w dyskusji naukowej. W większości zrealizowanych prac naukowych widać tożsamy podejście naukowców przy rozpatrywaniu układu kotła grzewczego na paliwa stałe, jako obiektu technicznego oddziałującego między człowiekiem i środowiskiem [1–2, 8, 12]. W publikacjach [1–3, 6, 8, 10–12] w znaczeniu termodynamicznym, kocioł grzewczy na paliwo stałe był rozpatrywany, jako zamknięty układ niejednorodny z silnym oddziaływaniem na środowisko zewnętrzne, zależnie od parametrów fizyczno-chemicznych użytego paliwa. Co więcej, parametry te wpływały znacząco na zmianę parametrów emisyjnych kotła. Podejście to rozpatruje problem badawczy jednocześnie w odniesieniu do emisji substancji szkodliwych oraz w odniesieniu do chemicznych aspektów procesu spalania. Analizując najpopularniejsze publikacje z zakresu emisji substancji szkodliwych ze spalania paliw stałych (załącznik 3), można zauważyć niezbyt częste poruszanie i analizowanie problemu związanego z analizą chemizmu procesu spalania paliwa

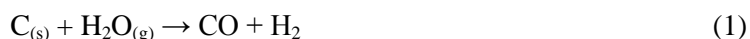
stałego w kotle. Kwestie związane z wpływem składu chemicznego spalanych paliw na emisję substancji szkodliwych z kotłów poruszono w publikacjach [1–4, 6, 7, 9, 12]. Ponadto, wcześniejsze badania naukowców obejmowały analizę wpływu konstrukcji urządzeń grzewczych oraz zachodzącego w nich procesu spalania na emisję zanieczyszczeń [4, 5]. Z publikacji [3–5] wynika, że poziom emisji substancji szkodliwych wiąże się bezpośrednio z parametrami technicznymi urządzenia i spalanej paliwa.

W publikacjach [10, 11] omówiono temat emisji substancji szkodliwych z urządzeń kotłowych pracujących na terenie Polski. Wynika z nich, że istotny wpływ na wielkość emisji substancji szkodliwych na danym terenie, ma sposób prowadzenia procesu spalania, amplituda temperatur oraz gęstość lokalizacji obiektów ciepłowniczych. Wyliczone stężenia pyłów w spalinach emitowanych przez kotły przekraczają wielokrotnie założenia norm i dyrektyw [10, 11]. Warto podkreślić skalę problemu, mianowicie z perspektywy jakości powietrza pyły, w szczególności cząstki stałe charakteryzowane przede wszystkim jako PM 2.5 oraz PM 10, są bardzo szkodliwe dla ludzi. Wykazują silne własności rakotwórcze. Co ważne, z danych statystycznych [10–12] wynika, że 84% emisji całkowitej cząstek PM 2.5 pochodzi ze spalania paliw, przy czym aż 49% to spalanie paliw stałych w gospodarstwach domowych, co dało łącznie 59 850 ton w ciągu roku 2019 dla PM 2.5 oraz 89 620 ton w ciągu roku 2019 dla PM 10. Problem ten skłania do pogłębienia badań nad ograniczeniem emisji pyłów z domowych źródeł ciepła. Skala problemu związana z emisją substancji szkodliwych na terenie Polski, powstałych w wyniku użytkowania kotłów grzewczych na paliwa stałe pokazuje konieczność wprowadzenia nowoczesnych technologii pozwalających znacząco ograniczyć ilość emitowanych pyłów do środowiska. Aktualnie prowadzone są również badania nad rzeczywistą eksploatacją kotłów grzewczych poruszające tematykę obniżania ilości emitowanych substancji szkodliwych, co w przypadku wdrożenia sugerowanych rozwiązań może przyczynić się do ich ograniczenia [12].

We wcześniej prowadzonych badaniach wykazano znaczący wpływ parametrów technicznych paliwa na zmienność stężeń masowych cząstek stałych (PM), tlenku węgla (CO) i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w spalinach [6]. Ponadto badania nad współspalaniem paliw węglowych z biomasą drzewną i nie drzewną pokazują zbieżne przebiegi emitowanych substancji szkodliwych [2]. Pozwala to zastosować analogiczne metody badawcze w przypadku badań urządzeń grzewczych zasilanych tymi paliwami [1, 2].

Dotychczas przeprowadzone badania nad zmianą jakości procesu spalania kotłów grzewczych małej mocy pod wpływem doprowadzonej pary wodnej dały zadowalające przesłanki dotyczące obniżenia emisji substancji szkodliwych generowanych przez kotły grzewcze na paliwa stałe zasilane węglem kamiennym, a przede wszystkim związane z obniżeniem ilości emitowanych cząstek stałych. W trakcie badań przeanalizowano pracę cieplno-emisyjną kotłów grzewczych na paliwa stałe w trakcie pracy z mocą nominalną i minimalną bez doprowadzanej pary wodnej oraz z parą wodną dodaną do komory spalania i komory dopalania w ilościach 0,7 kg/h oraz 3,6 kg/h.

W trakcie realizacji badań zaobserwowano znaczące obniżenie emisji PM oraz nieznaczne NO<sub>x</sub> przy jednoczesnym widocznym wzroście stężenia masowego emitowanego CO. Detekcja CO oraz wodoru (H<sub>2</sub>) w spalinach może dowodzić o zajściu reakcji zgazowania węgla po dostarczeniu pary wodnej. Mechanizm ten obrazuje poniższa reakcja chemiczna odwrotnej syntezy Fischera-Tropscha:



Na podstawie tej reakcji, można wnioskować, że w wyniku doprowadzenia pary wodnej do komory spalania zachodzi proces tworzenia CO z węgla pierwiastkowego (np. pochodzącego z pyłu), a to powoduje obniżenie ilości emitowanych PM przy jednoczesnej detekcji nadmiarowego CO w spalinach. Oznacza to, że doprowadzenie dodatkowego czynnika termodynamicznego do komory spalania powoduje reorganizację procesu spalania. Jednym z efektów reorganizacji procesu spalania jest widoczne obniżenie ilości tlenu w spalinach, jednak w przypadku przeprowadzonych badań nie zaobserwowano zmian w ilości pozostałego po procesie spalania tlenu. Świadczyć może to o tym, że doprowadzona do komory spalania para nie zastąpiła tlenu tylko stała się dodatkowym czynnikiem reagującym w procesie spalania. Innymi prawdopodobnymi reakcjami chemicznymi, które mogą zachodzić w trakcie doprowadzania pary wodnej do procesu spalania są:



Świadczyć o tym może detekcja w spalinach zmiennej ilości dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) oraz CO, którego emisja w porównaniu do normalnej pracy kotła wzrasta w skrajnych przypadkach o ponad 100% względem standardowej pracy palnika. Ponad-

to w trakcie spalania paliwa stałego w atmosferze pary wodnej, możliwa jest detekcja w spalinach znacząco wyższego udziału wodoru względem standardowego procesu spalania. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w trakcie spalania węgla w kotłach grzewczych przy jednoczesnym doprowadzeniu pary wodnej do komory spalania następuje wiele reakcji chemicznych, których wspólnym efektem jest widoczne obniżenie ilości emitowanych cząstek stałych i tlenków azotu. W skrajnych przypadkach następuje detekcja nadmiarowego tlenku węgla w spalinach.

Alternatywą do realizowanych badań może być przeprowadzenie procesu konwersji tlenku węgla, w którym znacznie zmniejszy się jego emisja poprzez utlenianie CO do CO<sub>2</sub>. Dzięki obniżeniu poziomu CO, można uzyskać lepsze parametry wymiany ciepła pomiędzy spalinami a wodą kotłową, co korzystnie wpłynie na sprawność urządzenia grzewczego. Zaobserwowano również, że doprowadzenie dodatkowych substancji chemicznych w obrębie płomienia powoduje odebranie z niego części energii oraz obniżenie (nawet o ok. 250°C) temperatury panującej w komorze spalania [7, 9, 12]. Obniżenie temperatury płomienia powoduje zmiany parametrów emisyjnych, efektem, czego jest np. obniżenie ilości emitowanych cząstek stałych oraz spadek ilości emitowanych tlenków azotu. Ponadto w trakcie procesu spalania widoczna jest pewna ilość wodoru większa niż w przypadku procesu spalania bez doprowadzonej do niego pary wodnej. Przekazanie ciepła wytwarzanego w procesie spalania z płomienia do pary wodnej doprowadzanej do komory spalania ogranicza udział mechanizmu termicznego powstawania tlenków azotu, powodując spadek emisji NO<sub>x</sub>. Mechanizm ten w przypadku kotłów niskotemperaturowych spalających paliwa stałe ma niewielki wpływ na powstawanie tlenków azotu, gdyż główny udział leży po stronie mechanizmu paliwowego. Podsumowując, dodanie pary wodnej do procesu spalania paliwa stałego wpływa na obniżenie emisji pyłów oraz tlenków azotu z urządzenia grzewczego małej mocy [6, 7, 9, 12].

## **6. OKREŚLENIE PROBLEMU BADAWCZEGO, TEZY ORAZ ZADAŃ BADAWCZYCH**

### **6.1 Główny problem badawczy**

W wyniku analizy literaturowej oraz przeprowadzenia badań wstępnych, opracowano główny problem badawczy. **Głównym problemem badawczym jest zbadanie wpływu doprowadzonej pary wodnej do procesu spalania kotła grzewczego zasilanego paliwem stałym na poziom emitowanych substancji szkodliwych.**

### **6.2 Teza badawcza**

W nawiązaniu do rozwiązywanego problemu badawczego postawiono następującą tezę: **Doprowadzenie pary wodnej do procesu spalania zachodzącego w kotle grzewczym na paliwo stałe może prowadzić do jego zmiany, a przez to do redukcji powstających w trakcie spalania substancji szkodliwych, szczególnie pyłów.**

### **6.3 Zadania badawcze**

W celu udowodnienia powyższej tezy i rozwiązania głównego problemu badawczego wyznaczono następujące zadania badawcze:

1. Opracowanie metody badawczej oraz metody wytwarzania i dostarczania pary wodnej do komory spalania i dopalania kotła grzewczego [7, 9, 12],
2. Opracowanie stanowiska i układu badawczego [1–6, 7, 9, 12],
3. Zbadanie wpływu doprowadzenia pary wodnej do komory spalania i komory dopalania kotłów grzewczych na paliwa stałe na jakość procesu spalania [7, 9–12],
4. Określenie parametrów granicznych, dla których zasadne jest zastosowanie układu doprowadzania pary wodnej do procesu spalania paliwa stałego w kotle grzewczym [1–5, 7–12],
5. Opracowanie algorytmu postępowania dla układu: kocioł grzewczy na paliwa stałe wraz z doprowadzeniem pary wodnej do procesu spalania [7, 9, 12].

## 7. METODY BADAWCZE WYKORZYSTANE DO REALIZACJI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ [1 – 5]

### 7.1 Obiekty badawcze oraz program realizacji badań

Do przeprowadzenia badań laboratoryjnych wytypowano dwa kotły grzewcze na paliwa stałe z automatycznym podawaniem paliwa znajdujące się w Laboratorium Procesów Konwersji Energii należącym do Instytutu Energetyki Ciepłej (ówczesznie Katedry Techniki Ciepłej). Wytypowanymi kotłami do badań były: kocioł produkcji firmy Heiztechnik model Q-EKO oraz kocioł produkcji firmy Elektrocycling model KN-20. Kotły te stanowią zaawansowaną konstrukcję, której działanie opiera się na rurowych wymiennikach ciepła, a dodatkowo wyposażone są w podajnik paliwa ze zintegrowanym paleniskiem. Kocioł KN-20 charakteryzuje się dodatkową komorą dopalającą umieszczoną równolegle nad komorą spalania, połączoną z komorą spalania przewodem spalinowym. W zależności od zastosowanego palnika mogą one spalać węgiel typu groszek w palniku standardowym lub dodatkowo gorszej jakości węgle i miał w palniku z funkcją obrotu górnej części palnika zwanej kielichem. Kotły mogą być również wyposażony w palnik przeznaczony do spalania biomasy. Kocioł Q-EKO dla pracy z mocą nominalną (15 kW) zużywał ok. 1,83 kg/h paliwa a dla mocy minimalnej (4,5 kW) zużywał ok. 0,55 kg/h. Kocioł KN-20 dla pracy z mocą nominalną (20 kW) zużywał ok. 2,43 kg/h paliwa a dla mocy minimalnej (6 kW) zużywał ok. 0,73 kg/h. Na Rysunku 1 przedstawiono widok obu obiektów badawczych.



**Rysunek 1** Kotły grzewcze użyte w trakcie badań. Po lewej stronie kocioł Q Eko 15, po prawej kocioł KN-20



Przeprowadzone badania podzielono na dwa etapy. Każdy z etapów podzielony był na poszczególne cykle badawcze wynikające z: typu użytego urządzenia grzewczego, mocy, z jaką pracował kocioł oraz miejsca i wydatku pary wodnej. W pierwszym etapie zbadano poziom emisji substancji szkodliwych dla kotła Q EKO 15 pracującego z mocą minimalną i nominalną, opalanego w sposób automatyczny węglem kamiennym, dla pracy bez dostarczonej pary wodnej i z jej udziałem. W drugim etapie zbadano poziom emisji substancji szkodliwych dla kotła KN-20 pracującego z mocą minimalną i nominalną, opalanego w sposób automatyczny węglem kamiennym dla pracy bez dostarczonej pary wodnej i z jej udziałem doprowadzonej do komory spalania i komory dopalania. Program zrealizowanych badań zaprezentowano w Tabeli 1.

**Tabela 1** Program zrealizowanych badań

Cykl pomiarowy	Typ kotła	Moc kotła	Strumień masy pary wodnej	Miejsce wtrysku pary wodnej
1.	Q EKO 15	30%	-	Komora spalania
2.		100%		
3.		30%	0,7 kg/h	
4.		100%		
5.		30%	3,6 kg/h	
6.		100%		
7.	KN-20	30%	-	Komora spalania
8.		100%		
9.		30%	0,7 kg/h	
10.		100%		
11.		30%	3,6 kg/h	
12.		100%		
13.	30%	0,7 kg/h	Komora dopalania	
14.	100%			
15.	30%	3,6 kg/h		
16.	100%			

## 7.2 Opis stanowiska badawczego i użytej aparatury pomiarowej

Z uwagi na konieczność pracy układu w szerszym zakresie mocy cieplnych oraz wymóg rejestracji większej liczby parametrów określających badany obiekt, wykorzystano rozbudowany układ pomiarowy. Zaprojektowany układ pomiarowy ma dwa niezależne tory podłączone bezpośrednio do układu komputerowego za pośrednictwem interfejsów USB. Tor analizatorów spalin Testo 350-S i Testo 380 był obsługiwany przez program Testo Easy Emission, umożliwiający bezpośredni pomiar i rejestrację wszystkich wyników pomiarów na komputerze. Program umożliwia rejestrację wszystkich pomiarów z interwałem próbkowania jednej analizy w trakcie wybranej ilości po-

branych próbek. Rozwiązanie to pozwala regulować tak czasookresami pomiarów, aby zachować jak największą trwałość sond pomiarowych a ponadto wychwycić w trakcie pomiarów zdarzające się skoki emisji zanieczyszczeń. Za pomocą układu analizatorów spalin można przeprowadzić bezpośredni pomiar następujących wartości charakteryzujących proces spalania:

- tlen  $O_2$  [%] zakres: 0 – 25%, błąd pomiarowy  $\pm 0,8\%$ ,
- tlenek węgla CO [ppm] zakres: 0 – 8000 ppm, błąd pomiarowy  $\pm 1,5$  ppm,
- tlenek azotu NO [ppm] zakres: 0 – 3000 ppm, błąd pomiarowy  $\pm 1,5$  ppm,
- zapylenie PM [ $mg/m^3$ ] zakres: 0 – 300 ppm, błąd pomiarowy  $\pm 5 mg/m^3$ ,
- dwutlenek azotu  $NO_2$  [ $mg/m^3$ ] wyliczone na podstawie pomiaru NO,
- wodór  $H_2$  [ppm] zakres: 0 – 1000 ppm, błąd pomiarowy  $\pm 0,5$  ppm,
- temperaturę wewnętrzną komory spalania/dopalania  $T_w$  [ $^{\circ}C$ ],
- temperaturę spalin  $T_{spal}$  [ $^{\circ}C$ ] błąd pomiarowy  $\pm 1^{\circ}C$ ,
- dwutlenek węgla [ $CO_2$ ] [%] – obliczone na podstawie pomiaru  $O_2$ ,
- współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  [-] – obliczone na podstawie pomiaru  $O_2$ ,
- sprawność kotła  $\eta$  [%] – obliczone na podstawie pomiaru  $O_2$  i CO.

Stężenia masowe CO,  $NO_x$  i PM przeliczono na  $mg/m^3$  dla 10%  $O_2$  w spalinach zgodnie z metodą badań kotłów grzewczych małej mocy opisaną w normie PN-EN 303-5:2012. Na Rysunku 2 zaprezentowano analizatory spalin użyte w badaniach.



**Rysunek 2** Widok analizatorów spalin użytych w badaniach

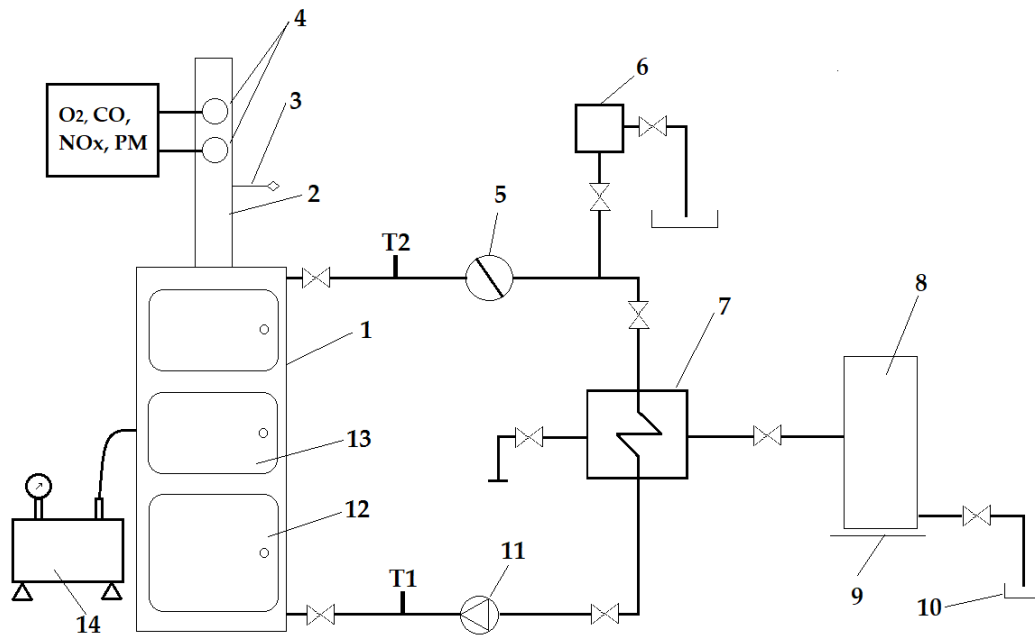
Temperatura spalin była średnią wartością z pomiaru wykonywanego przez pięć termopar znajdujących się w kominie pomiarowym. Temperatura w komorze spalania była rejestrowana na głębokości ok. 30 cm od pokrywy przedniej kotła z ulokowanym czujnikiem w odległości ok. 10 cm od powierzchni paleniska. Temperatura w komorze dopalania była rejestrowana w odległości ok. 10 cm poniżej strumienia wtryskiwanej pary w przenikający do komory płomień. W celu synchronizacji rejestrowanych niezależnie danych pomiarowych z dwóch torów wszystkie wyniki pomiarów uzupełniono o czas rejestracji odniesiony do zegara systemowego komputera PC. Tor pomiarowo-wykonawczy zaprojektowano z wykorzystaniem modułów firmy ADVANTECH serii ADAM 4000 i ADAM 4100. Są to dokładne moduły pomiarowe wykorzystywane do pracy w trudnych warunkach środowiskowych, wynikających z silnych zakłóceń elektromagnetycznych. Niezależne układy mikroprocesorowe odpowiedzialne za pracę pojedynczych modułów zapewniają szybkie i niezawodne działanie. Do sterowania zbudowanym torem wykorzystano program AdamView. W programie napisano odpowiednie procedury pomiarowe, według których następuje zapis wszystkich niezbędnych danych pomiarowych w pliku tekstowym z interwałem czasowym wynoszącym 1s.

W prezentowanej konfiguracji toru wykonawczo-pomiarowego rejestrowano następujące parametry:

- temperatura wody powrotnej do kotła,  $T_1$  [°C],
- temperatura wody wylotowej z kotła,  $T_2$  [°C],
- temperatura wody na wejściu do wymienników (woda sieciowa),  $T_{zw}$  [°C],
- temperatura wody na wyjściu z wymienników,  $T_{pw}$  [°C],
- strumień masy wody na wyjściu z wymienników,  $\dot{m}_w$  [kg/s]
- temperatura spalin,  $T_{spal}$  [°C],
- strumień objętości wody przepływającej przez kocioł,  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/h],
- strumień masy spalanego paliwa,  $\dot{P}$  [kg/s].

Pomiar strumienia objętości wody przepływającej w instalacji uzyskano przez powielenie sygnału cyfrowego wysyłanego przez miernik przepływu JS130-NC, w którym jest on wytwarzany przez układ kontaktronowy. Zużycie paliwa przez kocioł

określono poprzez pomiar masy wsadu paliwa przed badaniami i po skończonych badaniach. Na podstawie zużytego paliwa w czasie badań określano strumień masy spalane-  
go paliwa. Na Rysunku 3 przedstawiono schemat przykładowego stanowisko ba-  
dawczego wyposażonego w kocioł grzewczy z podłączoną do komory dopalania pa-  
rownicą.



**Rysunek 3** Schemat stanowiska badawczego

Opis: 1 – kocioł grzewczy na paliwa stałe 2 – komin pomiarowy 3 – pomiar temperatury spalin 4 – analiza chemiczna spalin 5 – pomiar strumienia czynnika obiegowego (wody) 6 – naczynie zbiorcze 7 – wymienniki ciepła 8 – zbiornik wody chłodzącej układ 9 – waga 10 – spływ wody chłodzącej 11 – układ pompowy 12 – komora spalania 13 – komora dopalania 14 – wytwornica pary T1 – pomiar temperatury wody na zasila-  
niu kotła, T2 – pomiar temperatury wody na powrocie kotła.

### 7.3 Paliwo użyte do badań

W badaniach wykorzystano węgiel kamienny (sortymentu groszek). Paliwo sto-  
sowano w stanie roboczym, a dla dokładniejszego określenia jego parametrów wykona-

no uprzednio analizę techniczną zgodnie z obowiązującymi normami (załącznik 3). Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 2.

**Tabela 2** Parametry techniczne paliwa użytego w badaniach

Parametr	Wartość uzyskana	Wartość graniczna zgodna z normą
Wilgoć przemijająca %	8,10	–
Wilgoć paliwa powietrzno-suchego %	2,00	–
Wilgoć całkowita %	10,10	≤ 11
Zawartość popiołu %	3,60	2 to 7
Zawartość części lotnych %	36,60	> 30
C %	78,10	–
S %	0,60	–
H <sub>2</sub> %	4,22	–
N <sub>2</sub> %	1,37	–
O <sub>2</sub> %	9,29	–
Ciepło spalania MJ/kg	30,57	–
Wartość opałowa MJ/kg	29,57	> 28

#### 7.4 Układ wytwarzania pary wodnej

W celu wytwarzania i dostarczania pary wodnej do komory spalania kotła grzewczego wykonano projekt urządzenia odparowującego wodę. Główną ideą zaprojektowanego urządzenia była możliwość jego peryferycznego ustawienia wedle obiektu badań (kotła) oraz możliwość podpięcia wylotu pary w dowolnym dostosowanym do tego celu miejscu w kotle. Ponadto w trakcie projektowania uwzględniono konieczność otrzymania wystarczającej ilości pary wodnej, aby jej dozowanie możliwe było do regulowania. Dodatkowo w ramach projektowanego urządzenia zadbano o pomiar podstawowych parametrów panujących po stronie wodnej i parowej poprzez pomiar temperatury i ciśnienia. Jako źródło energii cieplnej niezbędnej do zamiany wody ze stanu ciekłego na gazowy wybrano grzałkę elektryczną. Aby określić odpowiednią moc grzałki zaprojektowano naczynie ciśnieniowe służące do odparowania wody i gromadzenia pary wodnej. Przyjęto, że minimalna ilość pary wodnej, jaką należy otrzymać to min. 1 kg/h pary. Aby rozszerzyć spektrum badań wykonano obliczenia dla naczynia ciśnieniowego mogącego pomieścić ponad 1 kg wytworzonej przez odparowanie pary wodnej. Parametrem warunkującym wielkość naczynia oraz grubość ścianek były możliwe do zastosowania elementy bezpieczeństwa. Do projektowanego naczynia dobrano termomanometr, zawór bezpieczeństwa oraz zawory regulujące dostarczanie pary o następujących parametrach zaprezentowane w Tabeli 3.

**Tabela 3** Elementy wyposażenia układu wytwarzania pary

<b>Elementy</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	<b>p<sub>max</sub> [bar]</b>
Termomanometr	150	4
Zawór bezpieczeństwa	150	4
Zawór regulacyjny grzybkowy	150	30

Z dobranych elementów bezpieczeństwa widać, że maksymalne ciśnienie w naczyniu, jakie może zaistnieć to 4 bary a temperatura pary wodnej nie powinna przekraczać 150°C. Powyżej tego ciśnienia jego nadmiar zostanie upuszczony przez zawór. Z wytypowanego maksymalnego ciśnienia roboczego wykonano obliczenia wielkości naczynia ciśnieniowego oraz grubości ścianki naczynia z założeniem materiału w postaci stali St36K.

#### 7.4.1 Projekt układu wytwarzania pary wodnej

Proste naczynie ciśnieniowe jest to spawany zbiornik o dowolnym kształcie, który ma za zadanie zmagazynować określoną objętość gazu lub cieczy. Zgodnie z obowiązującymi przepisami krajowymi oraz aktami prawnymi nie obligatoryjnymi (norma WUDT–UC–WO–O/00:01.2005) każdy zbiornik niespełniający poniższe parametry podlega dozorowi technicznemu:

- jeżeli iloczyn pojemność zbiornika wyrażona w dm<sup>3</sup> (litrach) i nadciśnienie w nim panujące w barach jest większe niż iloczyn 50 bar i dm<sup>3</sup>,
- jeżeli nadciśnienie wewnątrz spawanego zasobnika przekracza 0,5 bar.

Obliczenia zostały wykonane zgodnie z normą wewnętrzną WUDT–UC–WO–O/00:01.2005, Urzędu Dozoru Technicznego zajmującego się z mocy prawa kwestiami naczyń ciśnieniowych. Zalecenia te nie są obligatoryjne, jednak funkcjonują one, jako dobra praktyka inżynierska.

#### 7.4.2 Określenie ciśnienia obliczeniowego

Ciśnienie obliczeniowe jest najwyższą wartością nadciśnienia czynnika roboczego jaka może zaistnieć w urządzeniu, nie uwzględniając chwilowego wzrostu ciśnienia spowodowanego działaniem urządzeń zabezpieczających. Ciśnienie obliczeniowe dla projektu założono na poziomie ciśnienia otwarcia zaworu bezpieczeństwa  $p_{max} = p_0 =$

4,0 bar. Większa wartość ciśnienia czynnika roboczego mogłaby być niebezpieczna w przypadku awarii, bądź nieszczelności któregoś z elementów wyposażenia stanowiska. Innym powodem jest konieczność wspomagania się dodatkowym urządzeniem lub źródłem w celu zwiększenia ciśnienia wody.

#### 7.4.3 Temperatura obliczeniowa

Temperaturę obliczeniową przyjmuje się, jako maksymalną wartość temperatury, jaką ścianka zbiornika może mieć podczas jego pracy, jednak nie może być ona mniejsza niż 20°C. W przypadkach zbiorników nieogrzewanych wartość temperatury obliczeniowej przyjmuje się za równą wartości najwyższej temperaturze czynnika stykającego się z elementem. Obliczenia wykonano na podstawie zaleceń zawartych w normie wewnętrznej WUDT-UC-WO-O/00:01.2005. W rozpatrywanym przypadku zakładane jest maksymalne wystąpienie temperatury na poziomie 150°C, dlatego temperaturę obliczeniową elementu przyjmuje wartość  $t_0 = t_m + 50^\circ\text{C} = 200^\circ\text{C}$ .

#### 7.4.4 Naprężenia dopuszczalne

Przekroczenie naprężeń większych niż dopuszczalne wiąże się z powstaniem odkształceń plastycznych, które mogą przeistoczyć się w odkształcenia trwałe, co w rezultacie może doprowadzić do stanu niezdatności obiektu. Wartość naprężenia dopuszczalnego dla temperatur obliczeniowych nieprzekraczających temperatury granicznej dla danego gatunku stali (parametr k) wyznacza się ze wzoru:

$$k = \frac{Re}{x} \quad (4)$$

gdzie:

Re – granica plastyczności [MPa]

x – współczynnik bezpieczeństwa, dobrany na podstawie rodzaju materiału konstrukcyjnego [-].

W celu dalszego modelowania zbiornika ciśnieniowego wykonanego ze stali St36k, odczytano następujące parametry  $Re = 450 \text{ MPa}$  oraz  $x = 1,35$  co dało:

$$k = \frac{450}{1,35} = 333,33 \text{ [MPa]} \quad (5)$$

#### 7.4.5 Obliczenia momentu gnącego

W wyniku działania sił wewnętrznych pochodzących od czynnika roboczego (wody i pary wodnej), podlegającego zmianie fazowej, ścianki zbiornika są poddawane momentowi gnącemu, który jest sumą wszystkich sił działających w danym przekroju. Wielkość momentu gnącego  $M_x$  oszacowano z równania:

$$M_x = p_0 \cdot L \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot x^2 - m \cdot x + \frac{1}{3} \cdot \frac{m^3 + n^3}{m + n} \right) \quad (6)$$

gdzie:

$p_0$  – ciśnienie projektowe (w projekcie: 4,0 bar),

$L$  – szerokość projektowanego zbiornika (w projekcie: 290 mm),

$x$  – wewnętrzna odległość od skrajnie lewej strony zbiornika do końca pierwszego otworu (w projekcie: 20 mm),

$m$  – połowa długości zbiornika (w projekcie: 50 mm),

$n$  – połowa wysokości zbiornika (w projekcie: 50 mm),

Podstawiając powyższe wartości otrzymano:

$$M_x = 4 \cdot 290 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot 20^2 - 50 \cdot 20 + \frac{1}{3} \cdot \frac{50^3 + 50^3}{50 + 50} \right) = 38,67 \text{ [Nm]} \quad (7)$$

#### 7.4.6 Obliczenia grubości ścianek zbiornika ciśnieniowego

Obliczeniową grubość ścianki zbiornika oblicza się ze wzoru:

$$g_0 = \frac{p_0 \cdot n}{2 \cdot k \cdot z} + \sqrt{\frac{4,5 \cdot p_0 \cdot A}{k \cdot z_1}} \quad (8)$$

gdzie:

$z = z_1$  – współczynnik wytrzymałościowy wzdłużnych mostków lub wzdłużnych złączy spawanych (w projekcie: 1),

$A$  – współczynnik pomocniczy, którego określa zależność:

$$A = \left| \frac{m^2}{2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{m^3 + n^3}{m + n} \right| = 416,67 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (9)$$

Zatem grubość ścianki projektowanego zbiornika ciśnieniowego, przy wartości ciśnienia obliczeniowego na poziomie  $p_0 = 4$  bar wynosi:



$$g_0 = \frac{4 \cdot 50}{2 \cdot 333,33 \cdot 1} + \sqrt{\frac{4,5 \cdot 4 \cdot 416,67}{333,33 \cdot 1}} = 5,04 \text{ [mm]} \quad (10)$$

Na podstawie dokonanych obliczeń dobrano grubość ścianki zgodnie z wartościami znormalizowanymi na poziomie 6 mm ze stali St36k, dzięki temu uzyskano pewność optymalnych wymiarów zbiornika oraz zabezpieczono go poprzez zapewnienie naddatku na korozję.

#### 7.4.7 Parametry eksploatacyjne urządzenia

Na podstawie obliczeń wykonano model rzeczywisty urządzenia służącego w dalszych badaniach, jako wytwornica pary. Jego parametry eksploatacyjne zaprezentowano w Tabeli 4.

**Tabela 4** Parametry eksploatacyjne naczynia ciśnieniowego

Parametr	Wartość	Jednostka
$p_{\max}$	4,00	[bar]
masa bez wody	13,00	
maks. masa z wodą	23,00	
maks. masa wody	10,00	[kg]
min poziom wody	15,61	
temp. pary	110,00 – 160,00	[°C]

Z przeprowadzonych obliczeń otrzymano następujące wymiary naczynia oraz podstawowe parametry eksploatacyjne zamieszczone w Tabeli 5.

**Tabela 5** Wymiary naczynia ciśnieniowego wraz z objętościami wody minimalnej zakrywającej grzałkę i objętości pozwalającej otrzymać min. 1 litr/h pary wodnej

Maksymalna objętość wody	Objętość [mm <sup>3</sup> ]	Objętość [dm <sup>3</sup> ]	Objętość [litr]
A 190			
B 180	9918000	9,92	9,92
C 290			
Minimalna objętość wody	Objętość [mm <sup>3</sup> ]	Objętość [dm <sup>3</sup> ]	Objętość [litr]
A 50			
B 180	2610000	2,61	2,61
C 290			
Objętość dla min. 1 litra pary	Objętość [mm <sup>3</sup> ]	Objętość [dm <sup>3</sup> ]	Objętość [litr]
A 140			
B 180	7308000	7,31	7,31
C 290			

#### 7.4.8 Dobór grzałki elektrycznej

Wybór mocy grzałki podparty jest wstępnymi parametrami wyjściowymi zbiornika na wodę przystosowanego do pracy z wysokim ciśnieniem wywołanym w wyniku odparowywania wody. Obliczeniowa moc dla przyjętej masy odparowanej wody w postaci 3 litrów oraz ogrzania wody sieciowej z temperatury od 10°C do 100°C wynosi:

$$P_{\text{grzałki}} = m_{\text{wody}} \cdot c_{p\text{wody}} \cdot \Delta T = 3 \text{ kg} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 90^\circ\text{C} = 1134 \text{ KJ} \quad (11)$$

Czas potrzebny do rozpoczęcia procesu odparowywania wody (osiągnięcie 100°C) przy założeniu temperatury wody sieciowej na poziomie 10°C i odparowaniu 1 litra wody wynosi:

$$t = \frac{E(W \cdot s)}{P(W)} = \frac{m_{\text{wody}} \cdot \Delta T \cdot c_{p\text{wody}}}{P} = \frac{3 \text{ kg} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 90^\circ\text{C}}{1500 \text{ W}} = 12,6 \text{ min} \quad (12)$$

Po wykonaniu prototypu naczynia ciśnieniowego i zamontowaniu grzałki oporowej o mocy 1500 W wraz z zaworem regulacyjnym przeprowadzono badania eksploatacyjne urządzenia pod kątem parametrów pary, jakie można osiągnąć z urządzenia. Otrzymane wyniki zaprezentowano w Tabeli 6.

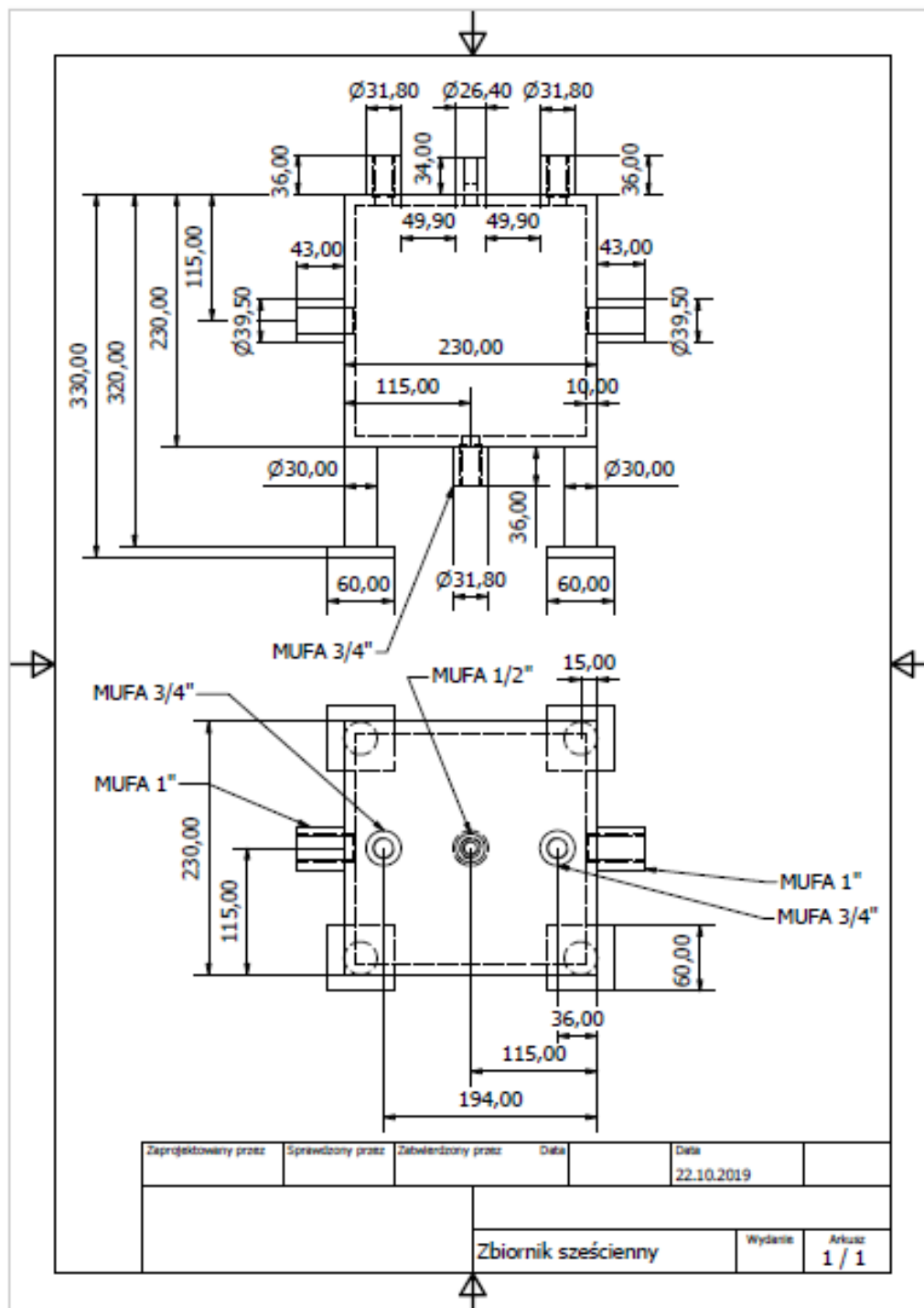
**Tabela 6** Parametry eksploatacyjne pary wodnej uzyskanej z prawnicy

<b>maksymalny strumień pary</b>		
temperatura	160,00	[°C]
ciśnienie	2,50	[bar]
strumień	3,60	[kg/h]
<b>minimalny strumień pary</b>		
temperatura	110,00	[°C]
ciśnienie	1,50	[bar]
strumień	0,71	[kg/h]

#### 7.4.9 Finalny model parownicy

Aby sterować pracą urządzenia zamontowano układ regulacyjny pozwalający zmieniać parametry grzewcze grzałki oraz utrzymywać stałe parametry odparowania wody. Dodatkowo zaopatrzono naczynie w pochwy pomiarowe, w których umieszczono dodatkowe termometry pozwalające kontrolować temperaturę wody oraz powstałej pary wodnej. Ponadto zamontowano zawór dopływowy pozwalający dopuszczać świeżą

wodę do naczynia po odparowaniu wody. Schemat urządzenia wraz z osprzętem i opisem poszczególnych elementów wyposażenia zaprezentowano na rysunkach 4, 5 i 6.



**Rysunek 4** Schemat naczynia ciśnieniowego zaprojektowanej wytwornicy pary wodnej



**Rysunek 5** Widok kompletnej urządzenia służącego do odparowania wody



**Rysunek 6** Widok kompletnej urządzenia służącego do odparowania wody

gdzie:

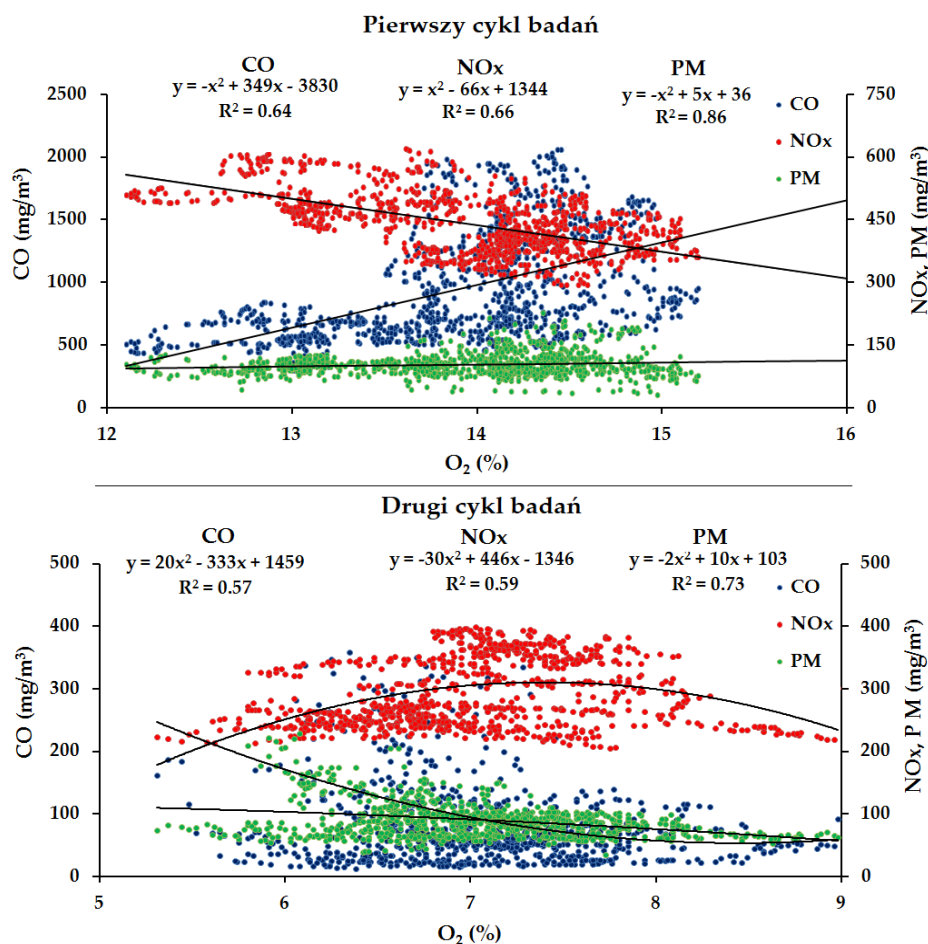
- 1 – układ sterowania, 2 – naczynie ciśnieniowe, 3 – grzałka elektryczna,
- 4 – termomanometr, 5 – zawór bezpieczeństwa, 6 – króciec zasilający parą,
- 7 – przewody elektryczne

## **8. WYNIKI BADAŃ WYKORZYSTANE DO REALIZACJI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

### **8.1 Badania i analiza zmian jakości procesu spalania pod wpływem doprowadzonej pary wodnej do kotła Q EKO 15**

Badania dla dostarczenia pary wodnej do kotła Q EKO 15 zostały podzielone na sześć cykli pomiarowych. W dwóch pierwszych cyklach badań przebadano urządzenie grzewcze pod kątem emitowanych substancji szkodliwych bez dodawanej pary wodnej. Badania te prowadzono dla dwóch mocy: minimalnej i nominalnej. W cyklu trzecim i czwartym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory spalania 0,7 kg/h pary wodnej. W cyklu piątym i szóstym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory spalania 3,6 kg/h. Badania zrealizowano zgodnie z założonym programem badań zamieszczonym w Tabeli 1.

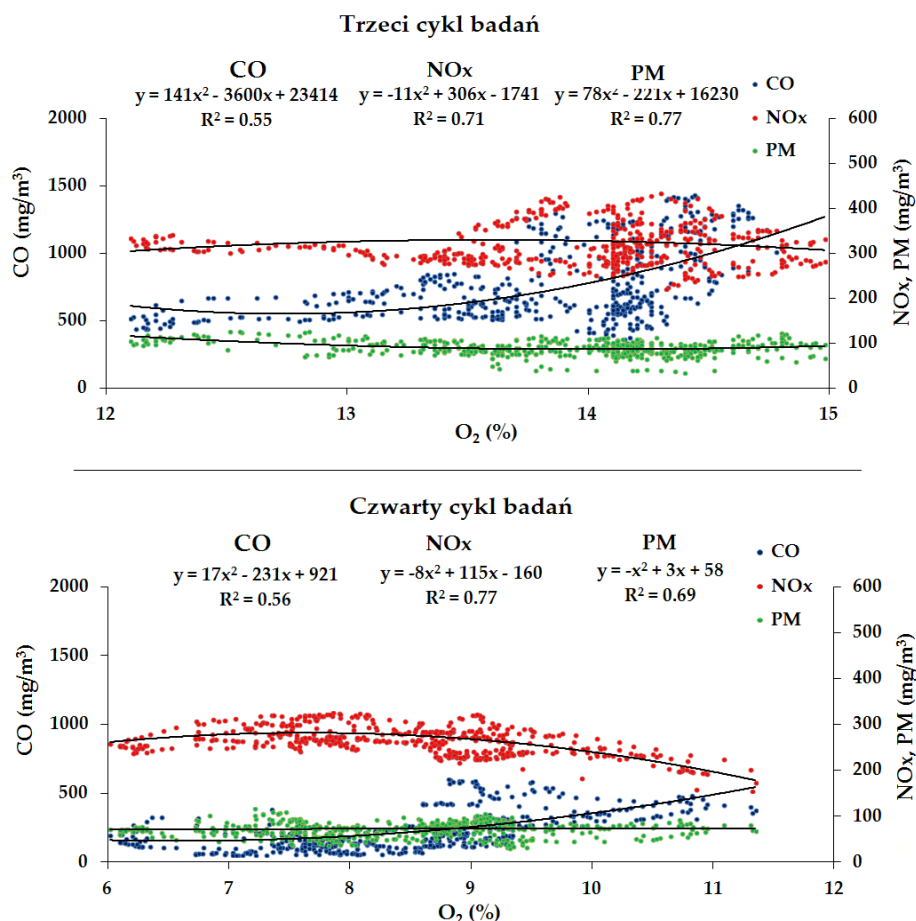
Dla pierwszego i drugiego cyklu badań zaobserwowano, że emisja CO mieściła się w zakresie średnio od 100 mg/m<sup>3</sup> do 946 mg/m<sup>3</sup>, emisja NO<sub>x</sub> w zakresie średnio od 295 mg/m<sup>3</sup> do 443 mg/m<sup>3</sup> a dla PM średnio od 90 mg/m<sup>3</sup> do 103 mg/m<sup>3</sup>. Emisja H<sub>2</sub> była śladowa (średnio od 0,68 mg/m<sup>3</sup> do ok. 1,12 mg/m<sup>3</sup>) granicząca z błędem pomiarowym analizatora spalin. Sprawność procesu spalania mieściła się w zakresie średnio od ok. 87% do ok. 91%. Na podstawie otrzymanych wyników widać, że kocioł spełnia klasę 3 zgodnie z normą PN-EN 303-5:2012 która definiuje wartości graniczne emisji CO i PM ze spalania paliw kopalnych dla kotłów o nominalnej mocy cieplnej ≤ 50 kW z automatycznym zasilaniem, które wynoszą odpowiednio 3000 mg/m<sup>3</sup> dla CO oraz 150 mg/m<sup>3</sup> dla PM. Na Rysunku 7 zaprezentowano rozkłady masowe podstawowych substancji szkodliwych emitowanych w trakcie pracy kotła Q EKO 15 z mocą minimalną i nominalną. Na wykresach zaprezentowano aproksymowane równania linii trendów obrazujące przybliżony rozkład emisji substancji szkodliwych odniesiony do zawartości tlenu w spalinach.



**Rysunek 7** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla pierwszego i drugiego cyklu badań

Dla trzeciego i czwartego cyklu badań zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej z wydatkiem  $0,7 \text{ mg/m}^3$  do komory spalania kotła spowodowało spadek emisji CO o ok. 17% dla pracy kotła z mocą minimalną natomiast dla pracy kotła z mocą nominalną spowodowała wzrost ilości emitowanego CO o ok. 156%. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła od ok. 13% do 19% bez względu na moc kotła. Emisja  $\text{NO}_x$  spadła o ok. 4% do 27% bez względu dla mocy kotła. W spalinach wykryto obecność wodoru w ilości średnio ok.  $5,62 \text{ mg/m}^3$  do  $8,87 \text{ mg/m}^3$ . Sprawność procesu spalania spadła maksymalnie o ok. 4%. W trakcie dostarczania pary wodnej do komory spalania zaobserwowano obniżenie temperatury spalin o ok.  $15^\circ\text{C}$  oraz temperatury panującej w komorze spalania o ok.  $46^\circ\text{C}$ , co korzystnie wpłynęło na zmniejszenie ilości  $\text{NO}_x$  powstających w procesach termicznych. Na Rysunku 8 zaprezentowano rozkłady masowe podstawowych substancji szkodliwych emitowanych w trakcie pracy

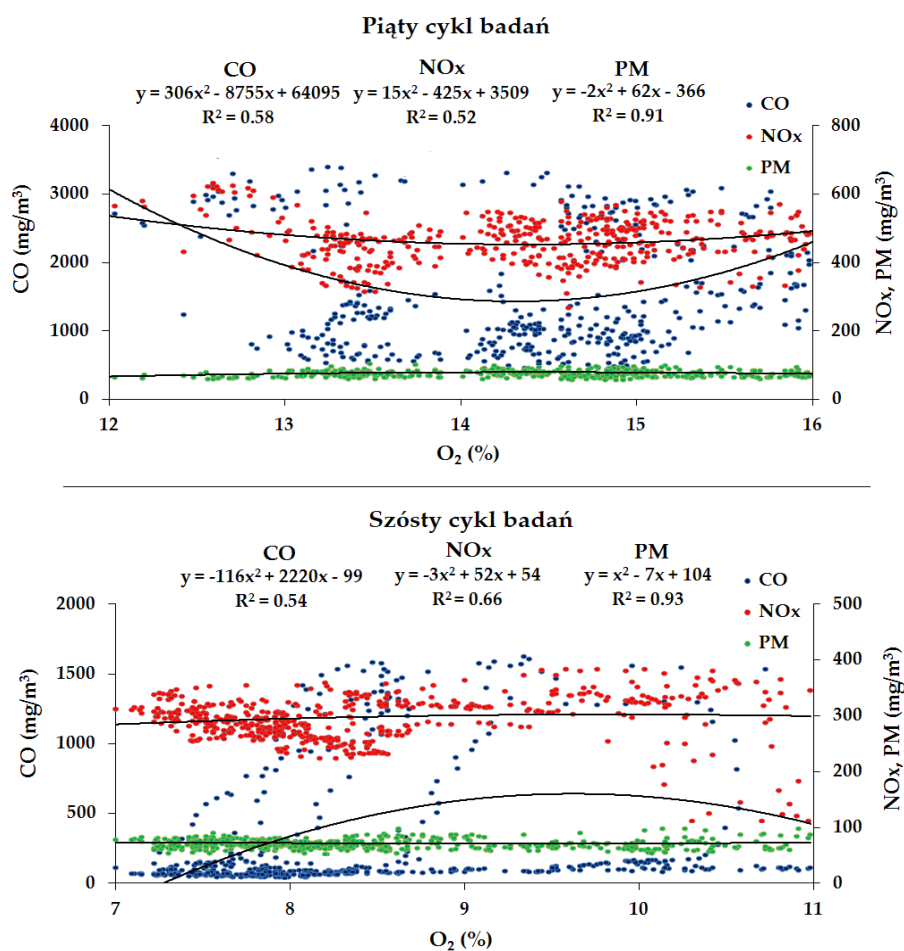
kotła z mocą minimalną i nominalną. Na wykresach zaprezentowano aproksymowane równania linii trendów obrazujące przybliżony rozkład emisji substancji szkodliwych odniesiony do zawartości tlenu w spalinach.



**Rysunek 8** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla trzeciego i czwartego cyklu badań

Dla piątego i szóstego cyklu badań zaobserwowano, że ilość emitowanego CO względem standardowego procesu spalania wzrosła średnio od ok. 80% do 268%. Wprowadzenie pary wodnej do procesu spalania spowodowało zmniejszenie emisji PM średnio od ok. 20% do 25%. Emisja NO<sub>x</sub> względem emisji z niemodyfikowanego procesu spalania wzrosła maksymalnie o ok. 5%. Przyczyną wzrostu emitowanych tlenków azotu mogła być dodatkowa ilość energii wprowadzona wraz z maksymalną ilością pary wodnej doprowadzonej do spalania. Sprawność procesu spalania zmalała średnio o ok. 3%. W spalinach wykryto H<sub>2</sub> w ilości od 5,25 mg/m<sup>3</sup> do ok. 18,38 mg/m<sup>3</sup>. Średnia tem-

peratura spalin dla procesu spalania z dodaną parą wodną w ilości 3,6 kg/h była niższa o 30°C, a temperatura w komorze spalania zmalała o ok. 86°C. Na Rysunku 9 zaprezentowano rozkłady masowe podstawowych substancji szkodliwych emitowanych w trakcie pracy kotła z mocą minimalną i nominalną. Na wykresach zaprezentowano aproksymowane równania linii trendów obrazujące przybliżony rozkład emisji substancji szkodliwych odniesiony do zawartości tlenu w spalinach.



**Rysunek 9** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla piątego i szóstego cyklu badań

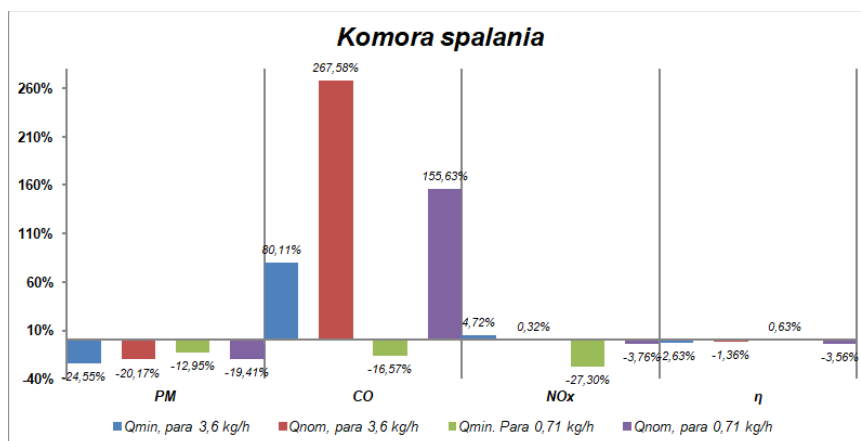
W Tabeli 7 przedstawiono wyniki uzyskane dla poszczególnego cyklu badań dla pierwszego etapu badań.



Tabela 7 Wyniki uzyskane z realizacji pierwszego etapu badań.

Cykl pomiarowy	Wartość pomiarowa	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	PM [mg/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	η [%]
1.	Średnia	946,35	443,18	102,84	0,68	87,12
	Mediana	762,00	436,50	99,00	0,66	84,81
	Dominanta	516,00	399,00	86,00	0,61	84,12
	Minimalna	300,00	295,00	31,00	0,22	78,52
	Maksymalna	2186,00	634,00	227,00	1,10	91,10
2.	Średnia	100,90	295,00	90,10	1,12	91,33
	Mediana	64,00	273,00	86,00	1,40	90,90
	Dominanta	22,00	269,00	66,00	1,08	89,73
	Minimalna	13,00	205,00	35,00	0,50	88,60
	Maksymalna	780,00	406,00	229,00	2,30	93,27
3.	Średnia	789,50	322,19	89,52	8,87	87,67
	Mediana	675,25	311,87	89,00	1,17	87,24
	Dominanta	675,24	294,29	86,00	0,67	86,75
	Minimalna	360,40	220,05	34,00	0,18	85,29
	Maksymalna	1564,60	523,78	127,00	45,10	90,24
4.	Średnia	257,93	283,92	72,61	5,62	88,08
	Mediana	198,06	268,13	74,00	1,28	89,01
	Dominanta	73,20	233,83	81,00	0,83	88,87
	Minimalna	54,75	197,17	31,00	0,11	83,11
	Maksymalna	722,81	386,91	117,00	16,89	90,39
5.	Średnia	1704,48	464,11	77,59	18,38	84,83
	Mediana	1323,04	470,43	77,00	1,49	84,50
	Dominanta	1227,85	450,26	68,00	1,86	83,40
	Minimalna	475,64	269,87	59,00	0,98	59,10
	Maksymalna	3921,38	598,05	108,00	93,21	91,80
6.	Średnia	370,89	295,93	71,93	5,25	90,09
	Mediana	107,45	167,00	71,00	1,31	90,38
	Dominanta	60,55	174,00	69,00	1,22	90,34
	Minimalna	48,25	114,15	54,00	0,56	87,00
	Maksymalna	1964,32	386,53	100,00	29,90	91,42

Na Rysunku 10 przedstawiono graficznie zmiany w emisji substancji szkodliwych oraz sprawności procesu spalania związane z doprowadzeniem do komory spalania pary wodnej pod różnym wydatkiem.

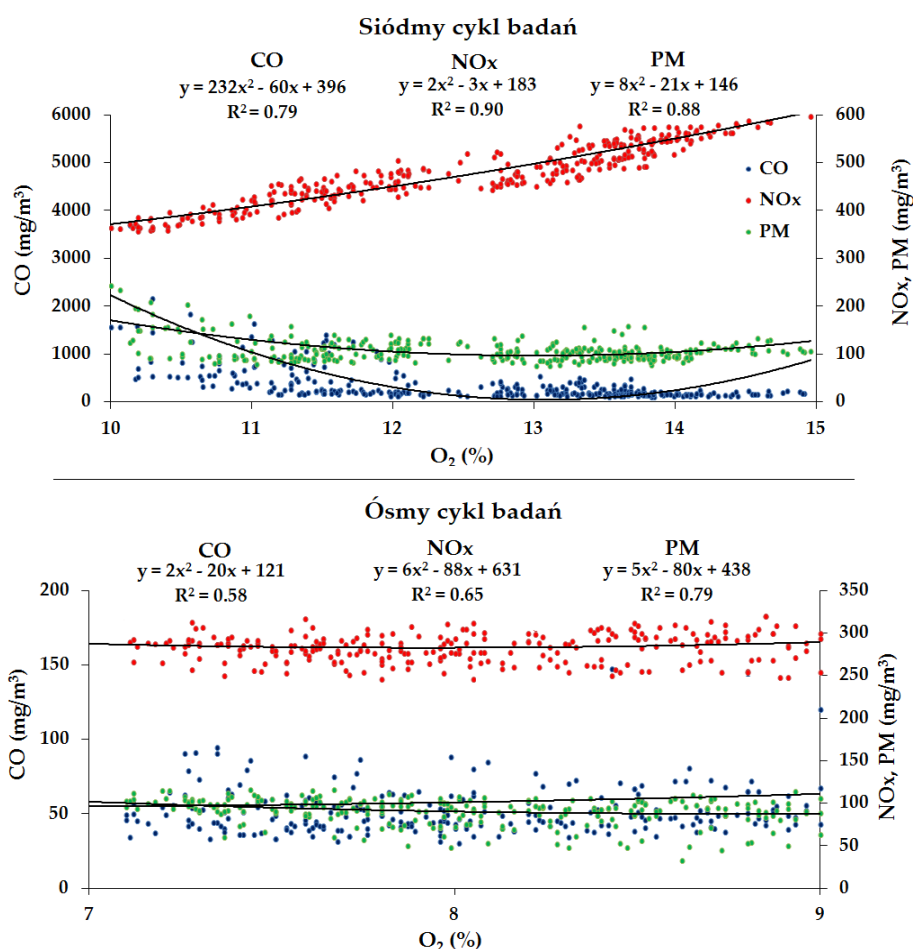


Rysunek 10 Zmiana parametrów emisyjnych i sprawności procesu spalania uzyskane dla pierwszego etapu badań (cykl od 3 do 6).

## 8.2 Badania i analiza zmian jakości procesu spalania pod wpływem doprowadzonej pary wodnej do kotła KN–20

Badania dla dostarczania pary wodnej do kotła KN–20 zostały podzielone na sześć cykli pomiarowych. W siódmym i ósmym cyklu badań przebadano urządzenie grzewcze pod kątem emitowanych substancji szkodliwych bez dodawanej pary wodnej. Badania te prowadzono dla dwóch mocy: minimalnej i nominalnej. W cyklu dziewiątym i dziesiątym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory spalania 0,7 kg/h pary wodnej. W cyklu jedenastym i dwunastym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory spalania 3,6 kg/h. W cyklu trzynastym i czternastym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory dopalania 0,7 kg/h pary wodnej. W cyklu piętnastym i szesnastym przeprowadzono badania dla kotła pracującego z mocą minimalną i nominalną z wtrysnięciem do komory dopalania 3,6 kg/h. Badania zrealizowano zgodnie z założonym planem badań zamieszczonym w Tabeli 1

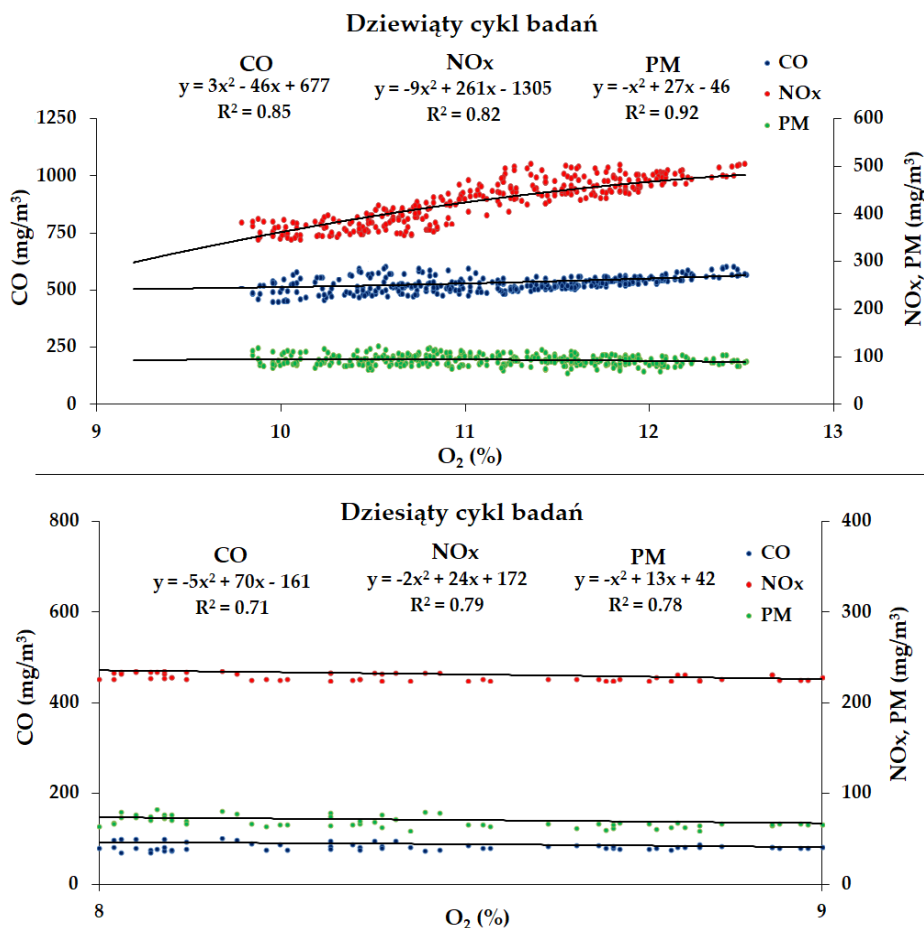
Dla siódmego i ósmego cyklu badań zaobserwowano, że emisja CO mieściła się w zakresie średnio od 58 mg/m<sup>3</sup> do 516 mg/m<sup>3</sup> natomiast, emisja NO<sub>x</sub> w zakresie średnio od 285 mg/m<sup>3</sup> do 479 mg/m<sup>3</sup>. Emisja PM mieściła się średnio w przedziale od 93 mg/m<sup>3</sup> do 112 mg/m<sup>3</sup>. Emisja H<sub>2</sub> mieściła się w zakresie średnio do 8 mg/m<sup>3</sup>. Sprawność procesu spalania mieściła się w zakresie średnio od ok. 90% do 95%. Na Rysunku 11 zaprezentowano rozkłady masowe podstawowych substancji szkodliwych emitowanych w trakcie pracy kotła KN–20 z mocą minimalną i nominalną. Na wykresach zaprezentowano aproksymowane równania linii trendów obrazujące przybliżony rozkład emisji substancji szkodliwych odniesiony do zawartości tlenu w spalinach.



**Rysunek 11** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla siódmego i ósmego cyklu badań.

Dla dziewiątego i dziesiątego cyklu badań zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej z wydatkiem 0,7 kg/h do komory spalania kotła spowodowało wzrost ilości emitowanego CO o ok. 58% w przypadku pracy kotła z mocą nominalną, natomiast dla mocy minimalnej zaobserwowano niewielki wzrost. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła o ok. 17% dla pracy z mocą minimalną, a dla mocy nominalnej kotła o ok. 19%. Emisja NO<sub>x</sub> spadła o ok. 12% dla pracy kotła z mocą minimalną, a dla pracy z mocą nominalną o ok. 17%. W spalinach wykryto obecność wodoru w ilości średnio ok. 3,46 mg/m<sup>3</sup> do 4,83 mg/m<sup>3</sup>. Sprawność procesu spalania wzrosła maksymalnie o ok. 2%. W trakcie dostarczania pary wodnej do komory spalania kotła KN-20 zaobserwowano wzrost temperatury spalin maksymalnie o ok. 8°C oraz temperatury panującej w komorze spalania maksymalnie o ok. 26°C. Temperatura w komorze dopalania wzrosła maksymalnie o ok. 5°C. Na Rysunku 12 zaprezentowano otrzymane roz-

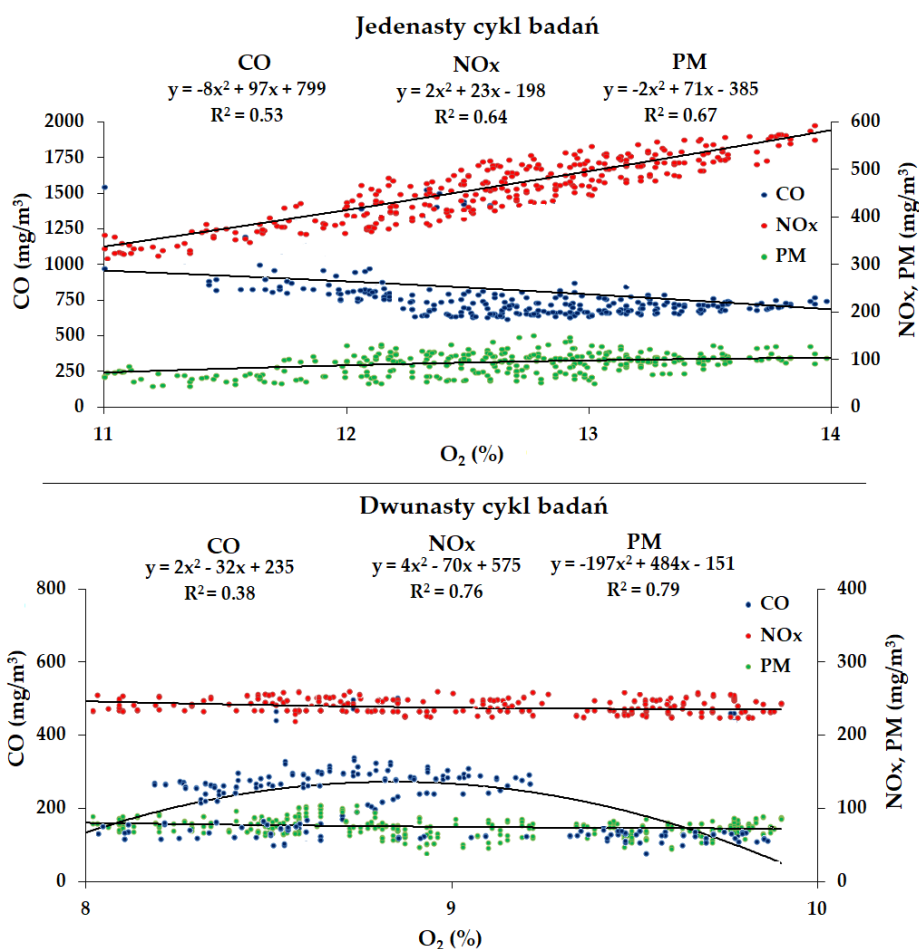
kłady masowe emisji substancji szkodliwych w odniesieniu do zawartości tlenu w spalinach oraz aproksymowane równania linii trendów.



**Rysunek 12** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla dziewiątego i dziesiątego cyklu badań

Dla jedenastego i dwunastego cyklu badań zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej z wydatkiem 3,6 kg/h do komory spalania kotła spowodowało wzrost ilości emitowanego CO od ok. 61% do ok. 243%. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła o ok. 18% bez względu na moc kotła. Emisja NO<sub>x</sub> spadła od ok. 4% do 16%. W spalinach wykryto obecność wodoru w ilości średnio ok. 8,02 mg/m<sup>3</sup> do 9,17 mg/m<sup>3</sup>. Sprawność procesu spalania w przypadku pracy kotła z mocą nominalną spadła o ok. 3% a dla pracy z mocą minimalną nie uległa zmianie. W trakcie dostarczania pary wodnej o wydatku 3,6 kg/h do komory spalania kotła KN–20 zaobserwowano wzrost temperatury spalin o ok. 30°C oraz temperatury panującej w komorze spalania

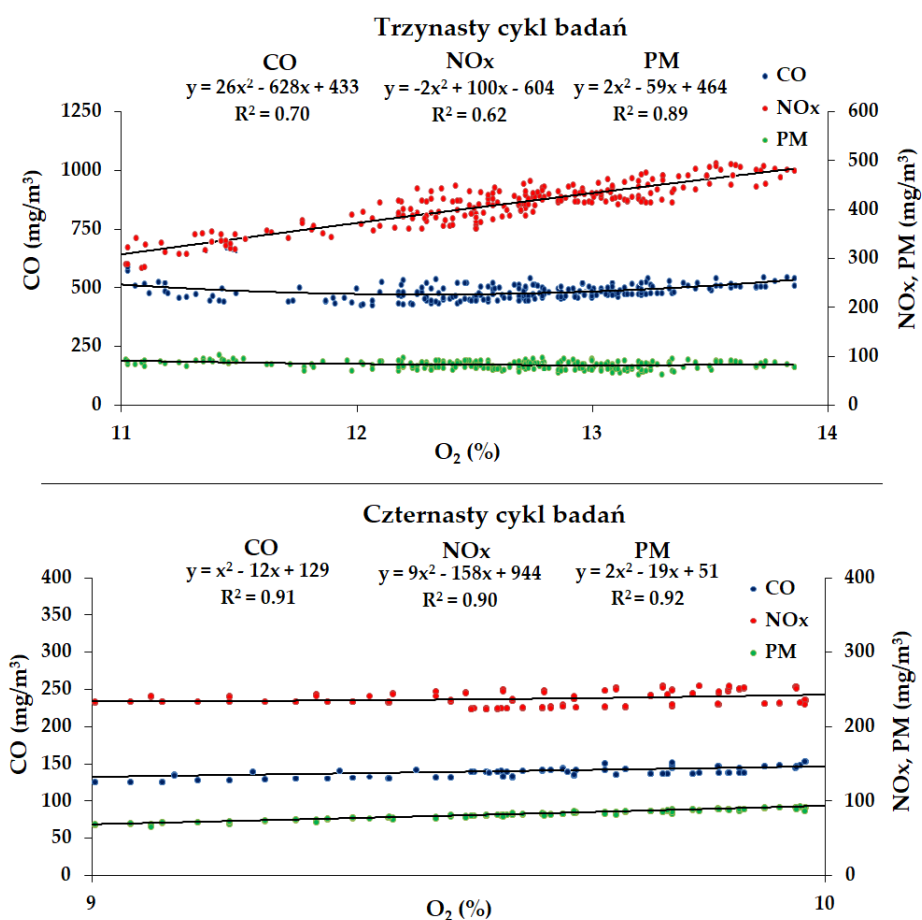
o ok. 48°C. Temperatura w komorze dopalania wzrosła o ok. 32°C. Na Rysunku 13 zaprezentowano otrzymane rozkłady masowe emisji substancji szkodliwych w odniesieniu do zawartości tlenu w spalinach oraz aproksymowane równania linii trendów.



**Rysunek 13** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla jedenastego i dwunastego cyklu badań

Dla trzynastego i czternastego cyklu badań zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej z wydatkiem 0,7 kg/h do komory dopalania kotła spowodowało spadek ilości emitowanego CO do ok. 6% a dla mocy nominalnej emisja CO wzrosła o ok. 142%. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła o ok. 26% dla pracy kotła z mocą minimalną a dla pracy z mocą nominalną spadła o ok. 10%. Emisja NO<sub>x</sub> spadła od ok. 16%. W spalinach wykryto obecność wodoru w ilości średnio ok. 5,34 mg/m<sup>3</sup> do 8,02 mg/m<sup>3</sup>. Sprawność procesu spalania dla pracy kotła z mocą minimalną wzrosła o ok. 2% a dla pracy z mocą minimalną zmalała o około 3%. W trakcie dostarczania

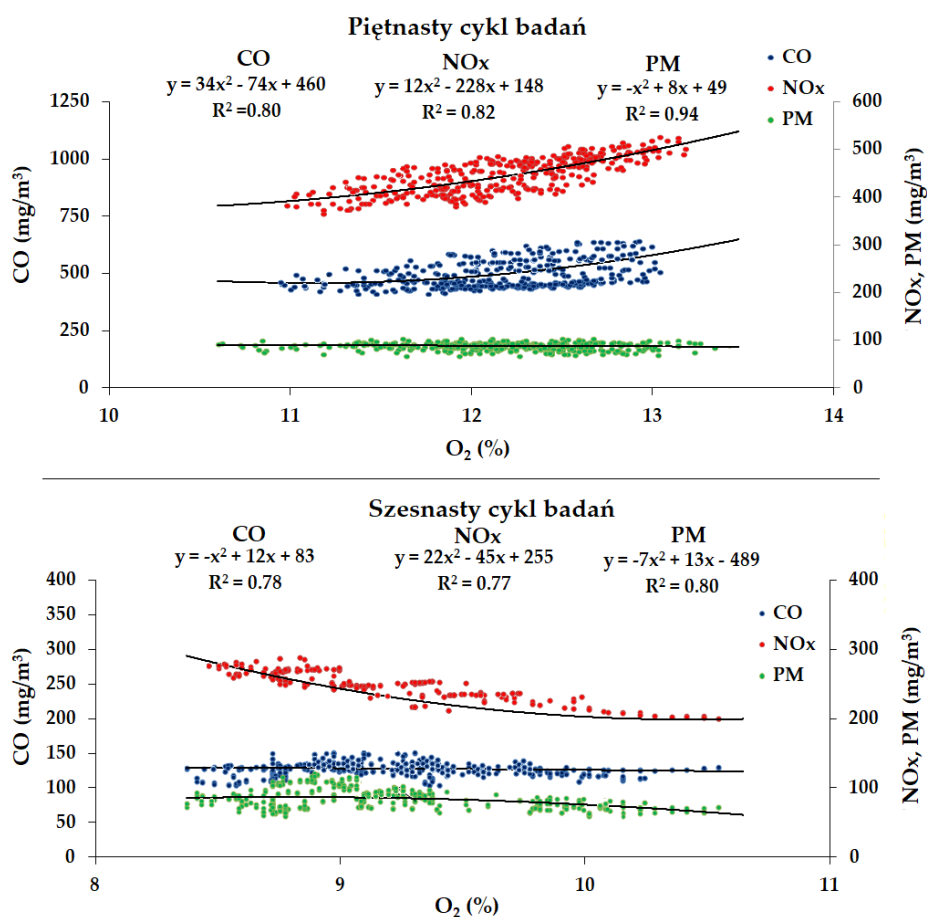
pary wodnej o wydatku 0,7 kg/h do komory dopalania kotła KN–20 zaobserwowano wzrost temperatury spalin o ok. 25°C oraz temperatury panującej w komorze spalania o ok. 20°C. Temperatura w komorze dopalania wzrosła o ok. 35°C. Temperatura w komorze dopalania wzrosła o ok. 28°C. Na Rysunku 14 zaprezentowano otrzymane rozkłady masowe emisji substancji szkodliwych w odniesieniu do zawartości tlenu w spalinach oraz aproksymowane równania linii trendów.



**Rysunek 14** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla trzynastego i czternastego cyklu badań

Dla piętnastego i szesnastego cyklu badań zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej z wydatkiem 3,6 kg/h do komory dopalania kotła spowodowało wzrost ilości emitowanego CO o ok. 119% dla pracy kotła z mocą nominalną, natomiast w przypadku pracy kotła z mocą minimalną emisja CO spadła o ok. 6%. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła o ok. 18% bez względu na moc kotła. Emisja NO<sub>x</sub>

spadła od ok. 17%. W spalinach wykryto obecność wodoru w ilości średnio ok.  $7,06 \text{ mg/m}^3$  do  $9,75 \text{ mg/m}^3$ . Sprawność procesu spalania dla pracy kotła z mocą nominalną spadła o ok. 3% a dla pracy z mocą minimalną wzrosła o ok. 2%. W trakcie dostarczania pary wodnej o wydatku  $3,6 \text{ kg/h}$  do komory dopalania kotła KN-20 zaobserwowano wzrost temperatury spalin o ok.  $45^\circ\text{C}$  oraz temperatury panującej w komorze spalania o ok.  $52^\circ\text{C}$ . Temperatura w komorze dopalania wzrosła o ok.  $59^\circ\text{C}$ . Na Rysunku 15 zaprezentowano otrzymane rozkłady masowe emisji substancji szkodliwych w odniesieniu do zawartości tlenu w spalinach oraz aproksymowane równania linii trendów.



**Rysunek 15** Rozkład masowy emisji substancji szkodliwych do pozostałości tlenu w spalinach dla piętnastego i szesnastego cyklu badań

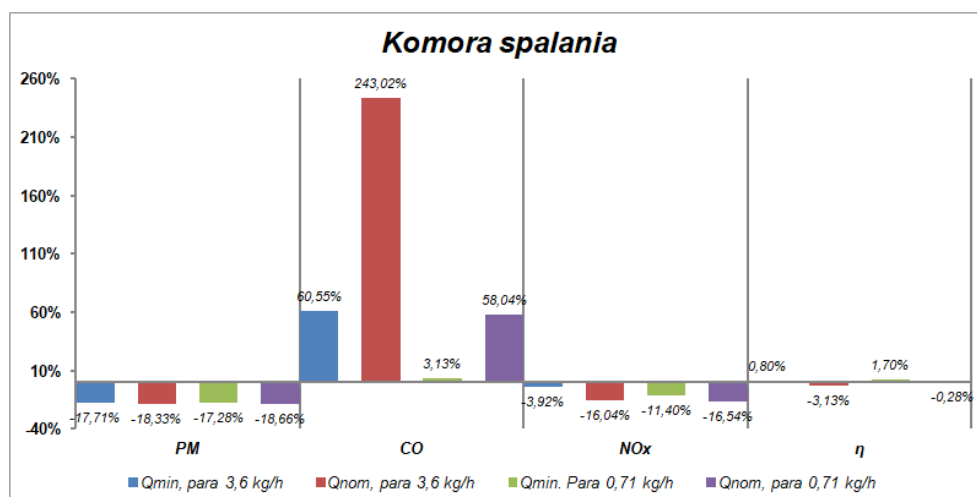
W Tabeli 8 przedstawiono wyniki uzyskane dla poszczególnego cyklu badań dla drugiego etapu badań.

**Tabela 8** Wyniki uzyskane z realizacji drugiego etapu badań

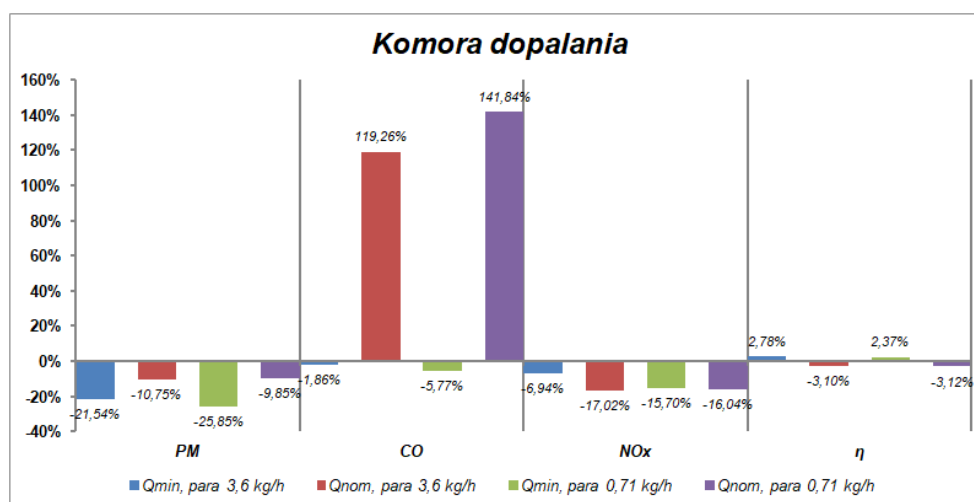
Cykl pomiarowy	Wartość pomiarowa	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	PM [mg/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	η [%]
7.	Średnia	516,11	479,23	112,65	0,46	89,96
	Mediana	209,66	477,21	103,00	0,43	94,80
	Dominanta	134,76	551,92	95,00	0,35	94,55
	Minimalna	107,96	351,45	75,00	0,00	85,32
	Maksymalna	5840,42	650,54	312,00	1,99	92,80
8.	Średnia	58,20	285,23	92,55	8,09	94,77
	Mediana	50,15	286,71	96,00	2,00	94,80
	Dominanta	65,34	286,38	103,00	0,98	94,55
	Minimalna	30,68	246,07	33,00	0,00	93,43
	Maksymalna	158,65	228,49	123,00	5,95	95,53
9.	Średnia	532,27	424,60	93,18	4,83	91,49
	Mediana	529,92	430,74	93,00	4,53	91,48
	Dominanta	500,66	364,48	89,00	1,52	91,67
	Minimalna	421,69	323,89	65,00	0,94	90,01
	Maksymalna	661,20	549,77	126,00	12,30	93,23
10.	Średnia	91,98	238,05	75,28	3,46	94,50
	Mediana	84,58	235,31	75,00	2,91	94,45
	Dominanta	80,51	235,47	75,00	2,66	94,43
	Minimalna	68,34	225,16	52,00	1,77	93,88
	Maksymalna	186,47	261,72	98,00	10,35	95,98
11.	Średnia	828,62	460,46	92,70	9,17	90,68
	Mediana	719,50	469,01	97,00	5,80	90,67
	Dominanta	685,95	375,22	101,00	4,43	92,30
	Minimalna	466,33	300,88	40,00	3,69	88,49
	Maksymalna	1809,03	600,78	162,00	41,38	92,84
12.	Średnia	199,64	239,47	75,59	8,02	91,80
	Mediana	82,60	235,47	76,00	6,86	91,83
	Dominanta	23,79	235,47	77,00	5,47	91,95
	Minimalna	10,84	220,00	40,00	3,44	91,13
	Maksymalna	656,87	261,72	106,00	15,93	92,55
13.	Średnia	486,33	460,46	83,53	5,34	92,09
	Mediana	478,08	417,21	84,00	5,02	92,03
	Dominanta	479,60	411,06	85,00	1,31	92,39
	Minimalna	417,91	282,84	59,00	1,04	90,70
	Maksymalna	609,54	496,93	104,00	14,20	93,41
14.	Średnia	140,75	239,47	83,43	8,02	91,81
	Mediana	140,44	235,47	84,04	7,81	91,80
	Dominanta	127,00	235,47	89,81	6,31	91,60
	Minimalna	118,02	220,00	59,19	3,44	91,14
	Maksymalna	163,06	261,72	107,01	15,93	92,50
15.	Średnia	506,50	445,97	88,39	9,75	92,46
	Mediana	467,74	453,14	89,00	2,67	91,85
	Dominanta	456,25	480,10	87,00	1,49	92,39
	Minimalna	414,34	356,09	67,00	0,78	90,66
	Maksymalna	790,83	531,05	105,00	38,17	95,54
16.	Średnia	127,61	236,69	82,60	7,06	91,83
	Mediana	126,92	251,38	79,00	5,57	91,86
	Dominanta	118,04	261,40	71,00	4,94	92,04
	Minimalna	103,93	159,16	54,00	3,89	90,68
	Maksymalna	173,79	289,77	122,00	17,14	92,69



Na Rysunkach 16 i 17 przedstawiono graficznie zmiany w emisji substancji szkodliwych oraz sprawności procesu spalania związane z doprowadzeniem do komory spalania i komory dopalania pary wodnej pod różnym wydatkiem.



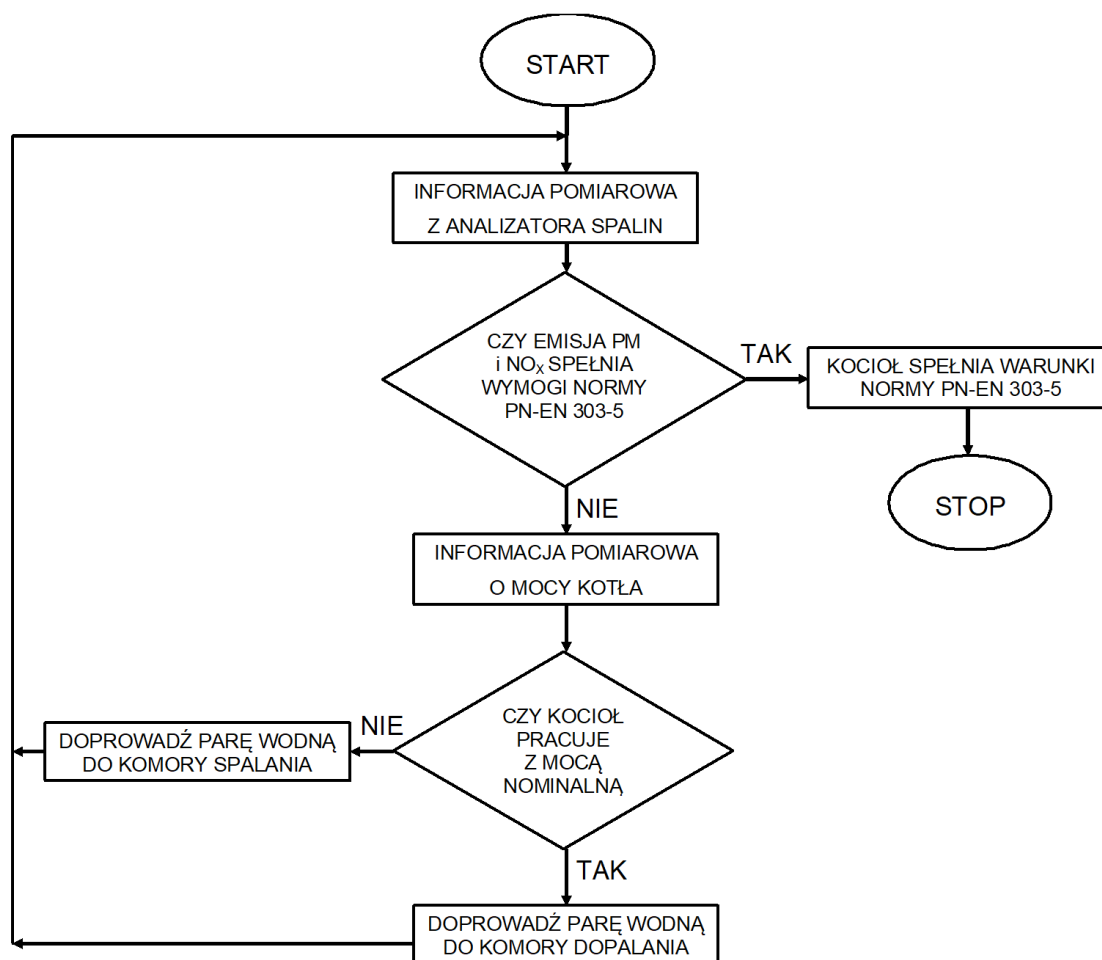
**Rysunek 16** Zmiana parametrów emisyjnych i sprawności procesu spalania uzyskane dla drugiego etapu badań z doprowadzeniem pary wodnej do komory spalania (cykle od 9 do 16)



**Rysunek 17** Zmiana parametrów emisyjnych i sprawności procesu spalania uzyskane dla drugiego etapu badań z doprowadzeniem pary wodnej do komory dopalania (cykle od 9 do 16)

Na podstawie analizy wyników badań wykonano algorytm postępowania dla doprowadzenia pary wodnej przegrzanej do procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych małej mocy wyposażonych w komorę dopalającą. Zaobserwowano, że im większy strumień masy pary wodnej doprowadzanej do procesu spalania, tym zwięk-

szeniu ulegała emisja CO o ok. (31% – 90%) względem standardowej pracy kotła. W przypadku emisji PM następował gwałtowny spadek emisji o ok. (12% – 25%), z kolei dla NO<sub>x</sub> emisja spadała nieznacznie o ok. (2% – 5%) w odniesieniu do normalnej pracy kotła. Efekt ten wynikać może z zajścia omawianych w wstępie reakcji chemicznych, co potwierdzić może detekcja CO i H<sub>2</sub> w spalinach, w stopniu innym niż w trakcie standardowej pracy kotła. W przypadku doprowadzenia pary wodnej do komory dopalającej nie obserwowano znaczącego wzrostu emisji CO, a otrzymywano korzystne obniżenie emisji PM (ok. 20%) oraz NO<sub>x</sub> (ok. 7%) względem standardowej pracy kotła. Algorytm postępowania dla doprowadzenia pary wodnej do procesu spalania paliwa węglowego w kotle małej mocy zaopatrzonego w standardową komorę spalania bądź komorę dopalania zaprezentowano na Rysunku 18.



**Rysunek 18** Schemat algorytmu postępowania dla układu kocioł grzewczy na paliwa stałe z doprowadzeniem pary wodnej do celu ograniczenia ilości emitowanych substancji szkodliwych

## 9. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzono badania nad spalaniem paliwa węglowego w środowisku pary wodnej. Do badań wykorzystano dwa kotły: pierwszy będący klasycznym kotłem grzewczym zasilanym węglem kamiennym oraz drugi posiadający parową komorę dopalania. W zależności od konfiguracji kotła, para wodna była dostarczana zarówno do komory spalania jak i komory dopalającej. Przeprowadzone badania potwierdziły, że doprowadzenie pary wodnej w obrębie komory spalania jak i komory dopalającej powoduje spadek emisji PM oraz w zależności od strumienia masy pary i mocy kotła detekcja w spalinach tlenku węgla i wodoru. W przypadku emisji tlenków azotu najczęściej obserwowano ich spadek w zakresie od kilku do kilkunastu procent. Biorąc pod uwagę fakt, że głównym źródłem powstawania tlenków azotu z kotłów małej mocy jest mechanizm paliwowy, można sądzić, że dodanie pary wodnej w obrębie spalanej paliwa wpływa na zmianę chemizmu procesu spalania. Dodanie pary wodnej do komory dopalającej wpływa korzystnie na właściwości emisyjne kotła z punktu widzenia emitowanych cząstek stałych. Z przeprowadzonych badań wynika, że poziom neutralizacji pyłów i tlenków azotu jest zbliżony do tych osiąganych przy doprowadzeniu pary do komory spalania, jednak wzrost emisji tlenku węgla jest znacznie większy niż w przypadku doprowadzenia pary wodnej do komory dopalania. Podstawą zrealizowanych badań była chęć potwierdzenia wcześniej przeprowadzonych badań nad możliwością obniżania emisji substancji szkodliwych przy zastosowaniu pary wodnej w kotłach grzewczych na paliwa stałe. Podstawą teoretyczną zrealizowanych badań była reakcja chemiczna:  $C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO + H_2$ , której efektem jest utlenienie węgla pierwiastkowego wchodzącego w skład np. sadzy. Zawartość tlenku węgla powstała w trakcie reakcji chemicznej była w stopniu nieznacznym zmniejszana w komorze dopalającej, przy znaczącym ograniczeniu zawartości emitowanych pyłów.

Uzyskane podczas badań efekty zmiany jakości procesu spalania są zadowalające, co skłonić może do rozpowszechnienia tej technologii wśród producentów kotłów grzewczych na paliwa stałe. Otrzymane wyniki i stworzony algorytm postępowania, mają charakter pracy badawczej – aplikacyjnej. Otrzymane rozwiązanie skierowane jest do konkretnej grupy odbiorców (przemysł kotłarski) pozwalając osiągnąć produkowanym kotłom parametry emisyjne wynikające z aktualnie obowiązujących przepisów prawa. Zastosowanie technologii doprowadzenia pary wodnej do komory dopalającej

kotła grzewczego pozwala ograniczyć ilość emitowanych pyłów i tlenków azotu przy jednoczesnym dopalaniu tlenku węgla, co wpływa korzystnie na poprawę parametrów ekologicznych kotła.

Jedną z przesłanek do dalszych prac badawczych jest ocena możliwości wytwarzania i dozowania mgły wodnej wytwarzanej metodami ultradźwiękowymi, układy takie zużywają znacząco mniej energii elektrycznej na wytworzenie czynnika termodynamicznego w postaci zawiesiny drobin wody w powietrzu oraz eliminują konieczność projektowania zbiornika ciśnieniowego. Rozpatrując zasadność modyfikacji kotłów niespełniających aktualnych przepisów Polskich jak i Unijnych dotyczących czystości spalin, jedną z możliwości poprawy ich parametrów emisyjnych oraz możliwości spełnienia obowiązujących norm jest modyfikacja ich konstrukcji w celu zaopatrzenia w dodatkową komorę dopalającą.

**Prezentowane w ramach rozprawy doktorskiej wyniki analizy możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej pozwoliły na opracowanie algorytmu, który pozwala na zaprojektowanie efektywnego systemu doprowadzenia dodatkowego czynnika termodynamicznego (pary wodnej) do procesu spalania, do celu jego poprawy, co udowadnia postawioną tezę naukową.**

## **10. SYNTETYCZNE UJĘCIE WKŁADU W ROZWÓJ DYSCYPLINY NAUKOWEJ: BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN – INŻYNIERIA MECHANICZNA**

Zrealizowana praca w ramach rozprawy doktorskiej pt. „**Analizy możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej**” ma charakter teoretycznej analizy wpływu doprowadzenia pary wodnej do procesu spalania i wpływu tego działania na jakość procesu spalania (analiza składu chemicznego spalin). Analiza teoretyczna podparta została badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi na dwóch obiektach badawczych w trzech konfiguracjach technicznych dla dwóch mocy grzewczych (16 cykli badawczych). Zrealizowane prace badawcze zorientowane są na poprawę jakości procesu spalania zachodzącego w kotłach grzewczych na paliwa stałe (głównie zasilanych węglem) do celu ograniczenia ilości emitowanych substancji szkodliwych do otoczenia. Syntetyzując, realizacja rozprawy doktorskiej umożliwiła:

- zaprojektowanie maszyny do wytwarzania pary wodnej zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa,
- zbudowanie stanowiska badawczego wraz z modelem wytwornicy pary wodnej dostosowanej do użytku domowego, do celu realizacji badań eksperymentalnych,
- wykonanie badań eksperymentalnych dla kotła o standardowej budowie (najczęściej stosowany w gospodarstwach domowych) dla pracy bez i z dostarczoną parą wodną,
- wykonanie badań eksperymentalnych dla kotła o nowoczesnej budowie (z zaimplementowaną dodatkową komorą dopalania) dla pracy bez i z dostarczoną parą wodną,
- wykonanie analizy otrzymanych wyników pod kątem znalezienia optymalnej konfiguracji pracy oraz konstrukcji kotła grzewczego z doprowadzeniem pary wodnej pod kątem obniżenia ilości emitowanych substancji szkodliwych,
- opracowanie modelu (algorytmu postępowania) do celu ograniczenia ilości emitowanych substancji szkodliwych z wykorzystaniem dostępnych urządzeń pomiarowych oraz pary wodnej dodanej do procesu spalania.

## **11. OMÓWNIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO–BADAWCZYCH**

### **11.1 Współpraca z krajowymi ośrodkami naukowymi oraz przedstawicielami przemysłu**

W swojej działalności naukowo-badawczej współpracowałem z firmą Termotechnika Michał Kotelba, która specjalizuje się w produkcji palników pelletowych typu Ecomat. Wspólnie z firmą Termotechnika zrealizowano pracę badawczą zatytułowaną: Innowacyjny kocioł kondensacyjny na pellet (nr: 05/56/PRJG/5139), zrealizowaną w okresie od 25.02.2019 do 30.04.2019, której byłem głównym wykonawcą. Celem zrealizowanych badań było zaprojektowanie i wdrożenie w firmie Termotechnika typoszerzemu kotłów grzewczych kondensacyjnych spalających pellet. Kotły grzewcze zostały zaprojektowane a następnie przebadane pod kątem osiągniętych parametrów cieplnych i emisyjnych. W trakcie badań wykazano bardzo dobre parametry cieplne oraz spełnienie obowiązujących norm emisyjnych dla kotłów grzewczych na biomasę. Otrzymane wyniki przeprowadzonych badań zostały rozpowszechnione w publikacji naukowej pt: The Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides from Boilers Supplied by a Pellet under the Influence of Changes in the Air–Fuel Equivalence Ratio, Journal of Ecological Engineering, nr 20, T. 10 s. 34–38, (artykuł indeksowany w bazie Web of Science®, 40 pkt – udział własny 80%) (załącznik 4).

Ponadto zrealizowano prace badawczo-rozwojowe z firmą LUMO Technika Grzewcza Sp. z o.o., która specjalizuje się w wytwarzaniu kotłów grzewczych na paliwa stałe oraz posiada własny dział badawczo-rozwojowy. Wspólnie z firmą LUMO Technika Grzewcza zrealizowano prace badawcze zatytułowane: Możliwość poprawy jakości procesu spalania kotła Vulcanus Plus przy zastosowaniu katalizatorów ceramicznych (nr: 05/56/PRJG/5141), zrealizowaną w okresie od 04.03.2019 do 15.03.2019, których byłem głównym wykonawcą. Celem zrealizowanych badań było zbadanie możliwości poprawy własności ekologicznych kotłów węglowych typoszerzemu Vulcanus Plus przy wykorzystaniu ceramicznych wkładów katalitycznych umieszczonych po obwiedni komory spalania. Przeprowadzane badania i późniejsze wdrożenie technologii przez firmę LUMO Technika Grzewcza poskutkowało uzyskaniem przez kotły typoszerzemu Vulca-

nus Plus najwyższej klasy czystości spalin zgodnie z obowiązującymi przepisami krajowymi i unijnymi. Otrzymane wyniki przeprowadzonych badań zostały rozpowszechnione w publikacji naukowej pt: Experimental studies on influence of ceramic catalysts on the quality of combustion process of low power boiler, Rynek Energii, nr 4 (143) s. 78–84, (40 pkt. (lista 2019) – udział własny 85%) (załącznik 4).

Ponadto, w załączniku 4 zamieszczono spis wszystkich publikacji naukowych niewchodzących w skład dysertacji.

## 11.2 Zgłoszenia patentowe

Aktualnie jestem autorem jednego zgłoszenia oraz współautorem trzech zgłoszeń patentowych. Kopie przyjęcia zgłoszeń patentowych zamieszczono w załączniku 5. W tabeli 9 przedstawiono zbiorcze zestawienie przygotowanych zgłoszeń patentowych. Zgłaszane do Urzędu Patentowego RP rozwiązania konstrukcyjne dotyczą mojego szerokiego spektrum zainteresowań. Wybrane z nich związane są z opisywanym w niniejszym autoreferacie osiągnięciem naukowym. Geneza powstania innych związana jest z moją aktualną działalnością naukowo-badawczą.

**Tabela 9** Zbiorcze zestawienie zgłoszeń patentowych

Numer zgłoszenia	Tytuł	Twórcy	Data zgłoszenia
436788	Wkład paleniskowy pozycjonująco - napowietrzający złożę paliwa stałego spalanego w palnikach retortowych albo sztokerowych	<b>Ciupek B. (50%)</b> Bartoszewicz J. (50%)	28.01.2021 r.
436789	Układ pozycjonowania kanałów napowietrzających komorę paleniskową palnika retortowego zasilanego paliwami stałymi	<b>Ciupek B. (55%)</b> Judt W. (30%) Lijewski P. (10%) Urbaniak R. (5%)	28.01.2021 r.
438249	Układ recyrkulacji spalin dla kotłów grzewczych małej mocy na paliwa stałe	<b>Ciupek B. (50%)</b> Jankowski R. (50%)	24.06.2021 r.
438250	Układ dozowania wody amoniakalnej dla palników retortowych kotłów niskotemperaturowych	<b>Ciupek B. (100%)</b>	24.06.2021 r.

### 11.3 Projekty i prace zewnętrzne na rzecz przemysłu, ekspertyzy i opinie

Zdobyte doświadczenie naukowo-badawcze oraz praktyka inżynierska pozwoliły mi na wykorzystanie wiedzy teoretycznej oraz wyników badań w szeregu prac wdrożeniowych na rzecz przemysłu. Do czasu przygotowywania niniejszego autoreferatu byłem wykonawcą dwunastu projektów badawczo-rozwojowych oraz prac zewnętrznych na rzecz przemysłu. Ponadto kierowałem projektem związanym z pracą statutową Instytutu Energetyki Ciepłej (DS 2020) i realizowałem trzy projekty związane z Młodą Kadrami (DSMK 2018, 2019, 2020). Ponadto byłem głównym wykonawcą w grantie naukowym współfinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

W zestawieniu poniżej zaprezentowano w sposób syntetyczny zrealizowane prace przemysłowe, ekspertyzy i opinie. Zestawienie wykonano w sposób chronologiczny realizacji poszczególnych prac badawczo-rozwojowych. W opisie zawarto numer wewnętrzny projektu, tytuł projektu okres realizacji oraz funkcję pełnioną w trakcie realizacji pracy.

1. **05/56/PRJG/5034** – Ocena możliwości wykorzystania Analizatora Jakości Procesu Spalania BCA-01 do regulacji procesu spalania paliw stałych pochodzenia węglowego w kotłach o mocach cieplnych z zakresu 100 do 3000 kW, 09.01.2018 – 25.01.2018, **główny wykonawca.**
2. **05/56/PRJG/5046** – Badanie analizy spalin kotła BioMax PLUS 20 kW, 17.05.2018 – 25.05.2018, **główny wykonawca.**
3. **05/56/PRJG/5051** – Analiza spalin kotłów z typoszeregu Vulcanus, 14.06.2018 – 20.06.2018, **główny wykonawca.**
4. **05/56/PRJG/5139** – Innowacyjny kocioł kondensacyjny na pellet, 25.02.2019 – 30.04.2019, **główny wykonawca.**
5. **05/56/PRJG/5141** – Możliwość poprawy jakości procesu spalania kotła Vulcanus Plus przy zastosowaniu katalizatorów ceramicznych, 04.03.2019 – 15.03.2019, **główny wykonawca.**
6. **05/56/PRJG/5152** – Opinia o innowacyjności kotła na zrębkę drzewną MaxPell GL 120, 02.07.2019 – 04.07.2019, **główny wykonawca.**



7. **05/56/PRJG/5154** – Ekspertyza techniczna kotła pelletowego o mocy 10 kW na zgodność z obowiązującymi normami i dyrektywami, 02.08.2019 – 26.08.2019, **główny wykonawca.**
8. **05/56/PRJG/5169** – Opinia o innowacyjności pompy ciepła Calla Verde M20 Comfort, 10.02.2020 – 14.02.2020, **główny wykonawca.**
9. **0712/PRJG/5189** – Ocena zasadności stosowania reaktora katalitycznego wraz z filtrem cząstek stałych do celów ograniczenia emisji substancji szkodliwych z kotłów co. na paliwa stałe, 08.10.2020 – 26.10.2020, **kierownik projektu.**
10. **0712/PRJG/5191** – Analiza możliwości zastosowania automatycznego układu regulacji pracującego w oparciu o Analizator BCA-02 do poprawy parametrów energetyczno-emisyjnych kotłów małej mocy na paliwa stałe w warunkach rzeczywistej eksploatacji, 21.10.2020 – 27.10.2020, **kierownik projektu.**
11. **0712/PRJG/5209** – Badanie: wartości spalania; ciepła spalania paliwa określenie parametrów w stanie roboczym, 22.04.2021 – 29.04.2021, **główny wykonawca.**
12. **0712/PRJG/5216** – Badanie i opinia o innowacyjności kotła FLAT 11, 28.07.2021 – 30.07.2021, **kierownik projektu.**

W zestawieniu poniżej zaprezentowano z sposób syntetyczny zrealizowane projekty związane z pracą statutową Instytutu Energetyki Ciepłej. Zestawienie wykonano w sposób chronologiczny realizacji poszczególnych prac badawczo-rozwojowych. W opisie zawarto numer wewnętrzny projektu, tytuł projektu okres realizacji oraz funkcję pełnioną w trakcie realizacji pracy.

1. **05/56/DSMK5056** – **DSMK 2018** Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych, **główny wykonawca.**
2. **05/56/SBAD/5148** – **DSMK 2019** Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych, **główny wykonawca.**
3. **0712/SBAD/5148** – **DSMK 2020** Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych, **główny wykonawca.**

4. **0712/SBAD/5180** – Analiza możliwości poprawy procesów ciepłno-emisyjnych urządzeń grzewczych na paliwa stałe oraz urządzeń współpracujących, **kierownik projektu.**

Byłem również głównym wykonawcą projektu POIR poddziałanie 4.1.4 pt „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwo stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej” projekt aplikacyjny umowa o dofinansowanie nr POIR.04.01.04-00-0135/16 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Grant realizowany był na Politechnice Poznańskiej w okresie od 02.03.2018 do 28.02.2020 (05/52/NCBR/7281).

Kopie kart tematów badawczych oraz zaświadczeń zamieszczono w załączniku 5.

#### **11.4 Otrzymane nagrody oraz pełnione funkcje**

W maju 2016 r. zostałem finalistą Konkursu na Pracę Inżynierską na Politechnice Poznańskiej organizowanego przez Veolia Energia Poznań oraz Politechnikę Poznańską. W styczniu 2021 r. otrzymałem List Gratulacyjny dla wyróżniającego się nauczyciela akademickiego z rąk Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki. W dniu 06.10.2021 otrzymałem Nagrodę Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia dydaktyczne uzyskane w roku poprzedzającym. Od 2020 r. jestem opiekunem Laboratorium Procesów Konwersji Energii, laboratorium w swojej dotychczasowej działalności naukowo-badawczej specjalizowało się w badaniach procesów ciepłno-emisyjnych urządzeń grzewczych w szczególności kotłów. Po objęciu funkcji opiekuna laboratorium dążę do zwiększania innowacyjności naukowej przez realizowane w laboratorium prace badawcze, stąd w 2018 r. zainicjowałem doposażenie laboratorium w nowoczesne urządzenia grzewcze w tym i kocioł grzewczy zasilany biomasą na podstawie porozumienia z firmą Termotechnika Michał Kotelba. Ponadto, aby zwiększyć konkurencyjność i innowacyjność realizowanych prac badawczo-naukowych w laboratorium zainicjowałem podpisanie porozumienia o współpracy z firmami: Termotechnika Michał Kotelba oraz firmą LUMO Technika Grzewcza. Na podstawie podpisanych porozumień o współpracy zrealizowanych zostało kilka projektów badawczych, których wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych. Dodatkowo współorganizowałem wykłady otwartych z cyklu „Spotkania z Przemysłem” zrealizowane w roku akademickim 2018/2019 na Politechnice Poznańskiej. Celem cyklu wykładów otwar-

tych, na których poruszane były najnowsze osiągnięcia techniki z zakresu energetyki było podniesienie umiejętności i wiedzy praktycznej studentów studiujących na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu. Ponadto jestem członkiem Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników Polski (SIMP) działam w sekcji energetycznej.

Kopie dokumentów potwierdzających otrzymane nagrody i dokonania znajdują się w załączniku 5.

### **11.5 Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne**

Od początku objęcia stanowiska nauczyciela akademickiego w strukturach Politechniki Poznańskiej intensywnie angażowałem się w organizację procesu dydaktycznego organizowanego i realizowanego w ramach dawnej Katedry Techniki Ciepłej, obecnego Instytutu Energetyki Ciepłej. W ramach prowadzonego procesu dydaktycznego (od 2018 roku) można wyróżnić następujące przedmioty:

- Termodynamika techniczna (ćwiczenia, laboratorium) – Wydział Inżynierii Transportu / Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
- Termodynamika (ćwiczenia, laboratorium) – Wydział Inżynierii Transportu / Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
- Elementy termodynamiki i mechaniki płynów (laboratorium) – Wydział Inżynierii Transportu / Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
- Elementy teorii termodynamiki technicznej, łączności i funkcjonowania człowieka w lotnictwie (laboratorium) – Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
- Spalanie paliw i biomasy (wykład, ćwiczenia, laboratorium) – Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
- Kotły przemysłowe (ćwiczenia, projekt) – Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
- Energetyka konwencjonalna (laboratorium) – Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
- Rurociągi energetyczne (projekt) – Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,

- Techniki informatyczne (laboratorium) – Wydział Inżynierii Transportu / Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,

## 12. ZBIORCZE ZESTAWIENIE OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

W tabeli 10 zestawiono ilościowo dorobek naukowy. Do oceny dorobku naukowo-badawczego posłużono się modelem wykorzystywanym przy ewaluacji za lata 2017-2021. Oznacza to, że punkty za artykuły wydane w latach 2019-2021 zostały obliczone na podstawie obowiązującej listy MNiSW z dnia 31.07.2019 r., natomiast liczba punktów dla publikacji wydanych w 2018 r. została obliczona na podstawie obowiązującej w tym czasie ujednoliconej listy czasopism MNiSW 2013-2016. W przypadku recenzowanych materiałów konferencyjnych zaindeksowanych w Thomson Reuters® Web of Science® oraz Scopus® z lat 2019-2021 przyjęto punktacje zgodną z rozdziałami w monografii i dziedziczenie punktów z listy wydawnictw MNiSW z dnia 31.07.2019 r. Do oceny dorobku wykorzystano wskaźniki bibliograficzne w postaci liczby cytowań oraz indeksu Hirscha z trzech najpopularniejszych baz: Thomson Reuters® Web of Science®, Scopus® oraz Google Scholar, jak również współczynnik Impact Factor. W przypadku projektów oraz zgłoszeń patentowych zastosowano wskaźnik ilościowy. Całość dorobku została podzielona w tabeli na dwie części, z których pierwsza dotyczy Głównego Osiągnięcia Naukowego, a druga dotyczy dodatkowej działalności naukowej. W ostatniej kolumnie przedstawiono również sumaryczną wartość punktów bądź wskaźników bibliograficznych i ilościowych. W tabeli dokonano podziału punktów na tzw. „stare” (2018 r.) do których zaliczane są publikacje z roku 2018 i recenzowane materiały konferencyjne zaindeksowane w Thomson Reuters® Web of Science® i Scopus® oraz „nowe” (2019-2021) do których zaliczane są publikacje z lat 2019-2021 i materiały konferencyjne z lat 2019-2021.

Analiza możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej

**Tabela 10** Zestawienie ilościowe dorobku naukowego

	Główne osiągnięcia naukowe	Punkty	Dodatkowa działalność naukowa	Punkty	Sumaryczna wartość punktów / wskaźników
Liczba artykułów w czasopiśmie naukowych wyróżnionych w Journal Citation Reports®	7	0 (2018) 640 (2019-21)	2	0 (2018) 180 (2019-21)	0 (2018) 820 (2019-21)
Liczba artykułów w recenzowanych materiałach konferencyjnych indeksowanych w Thompson Reuters® Web of Science® lub Scopus®	1	0 (2018) 5 (2019-21)	3	0 (2018) 15 (2019-21)	0 (2018) 20 (2019-21)
Liczba pozostałych artykułów	4	40 (2018) 0 (2019-21)	8	33 (2018) 130 (2019-21)	73 (2018) 130 (2019-21)
Liczba zgłoszeń patentowych	0	–	4	–	4
Liczba projektów i prac zewnętrznych	0	–	18	–	18
Liczba cytowań – baza Web of Science®	17	–	12	–	29
Index Hirscha – baza Web of Science®	2	–	+2	–	4
Liczba cytowań – baza Scopus®	5	–	+9	–	14
Index Hirscha – baza Scopus®	1	–	+2	–	3
Liczba cytowań – baza Google Scholar®	44	–	14	–	58
Index Hirscha – baza Google Scholar®	3	–	+1	–	4
Sumaryczny Impact Factor	15,053	–	3,468	–	18,521
Liczba punktów	–	40 (2018) 645 (2019-21)	–	33 (2018) 325 (2019-21)	73 (2018) 970 (2019-21)
Liczba punktów (udział własny)	–	33,00 (2018) 369,50 (2019-21)	–	24,23 (2018) 158,75 (2019-21)	57,23 (2018) 528,25 (2019-21)



DISSERTATION SUMMARY

**MSc Eng. Bartosz Ciupek**

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF IMPROVING  
THE COMBUSTION PROCESS OF SOLID FUELS IN LOW  
POWER BOILERS WITH THE USE OF WATER STEAM**

Thesis supervisor:

DSc Eng. Rafał Urbaniak

Associate thesis supervisor:

DSc Eng. Damian Joachimiak

Poznań 2021

## TABLE OF CONTENTS

<b>1. Dissertation data.....</b>	<b>56</b>
1.1 Dissertation title .....	56
1.2 List of scientific works constituting a doctoral dissertation .....	56
1.3 Abstract .....	58
<b>2. Justification of the selected topic.....</b>	<b>60</b>
<b>3. Defining the research problem, thesis and research tasks .....</b>	<b>61</b>
3.1 Main research problem.....	61
3.2 Research thesis.....	61
3.3 Research tasks.....	61
<b>4. Research results used to complete the dissertation.....</b>	<b>62</b>
4.1 Research and analysis of combustion process quality changes under the influence of supplied steam to Q EKO 15 boiler.....	62
4.2 Research and analysis of combustion process quality changes under the influence of supplied steam to KN-20 boiler .....	64
<b>5. Final Conclusions .....</b>	<b>68</b>
<b>6. Synthetic approach to the contribution to the development of a scientific discipline: Machine Design     and Exploitation – Mechanical Engineering .....</b>	<b>70</b>
<b>7. Summary of scientific and research achievements .....</b>	<b>71</b>



## 1. DISSERTATION DATA

### 1.1 Dissertation title

The title of a doctoral dissertation under Art. 13 sec. 2 of the Act of March 14, 2003 on academic degrees, academic title and on degrees and title in the field of art (Journal of Laws of 2017, item 1789) is:

**Analysis of the possibility of improving the combustion process of solid fuels  
in low power boilers with the use of water steam**

The doctoral dissertation consists of 12 selected publications, including: 7 publications in peer-reviewed scientific journals distinguished in Journal Citation Reports® indexed in Thomson Reuters® Web of Science®, 1 publications in peer-reviewed conference materials indexed or pending indexation in Thomson Reuters® Web of Science®, 4 publication in a peer reviewed scientific journal listed on the B list of journals published by the Polish Ministry of Science and Higher Education.

### 1.2 List of scientific works constituting a doctoral dissertation

1. **Ciupek B.**, Urbaniak R., Bartoszewicz J., 2018, *Emisja tlenku węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, no 3, T.49, p.90–94, DOI: 10.15199/9.2018.3.2 [10 points (list 2013–2016) – personal contribution 40%],
2. **Ciupek B.**, 2018, *Możliwość obniżenia emisji substancji szkodliwych z kotła małej mocy przez współspalanie węgla kamiennego z biomasą nieдрzewną*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, no 7, T.49, p.257–260, DOI:10.15199/9.2018.7.2 [10 points (list 2013–2016) – personal contribution 100%],
3. **Ciupek B.**, 2018, *Wpływ zawirowania strugi spalin na obniżenie emisji pyłów oraz podniesienie sprawności cieplnej kotła peletowego*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, no 8, T.49, p.333–338, DOI:10.15199/9.2018.8.6 [10 points (list 2013–2016) – personal contribution 100%],

4. **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2018, *Optimization of the Retort Burner Construction to Reduce Emission of Harmful Substances*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, no 12, T.49, p.519–524, DOI:10.15199/9.2018.12.8 [10 points (list 2013–2016) – personal contribution 90%],
5. **Ciupek B.**, Bartoszewicz J., 2019, *The influence of geometry of primary air channels in standard retort burners on dust emission*, MATEC Web of Conferences, vol.254, p.04009–1–11, DOI:10.1051/mateconf/201925404009 [indexed in Web of Science®, 5 points – personal contribution 90%],
6. **Ciupek B.**, Janeba–Bartoszewicz E., Urbaniak R., 2019, *Wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny spalin*, Przemysł Chemiczny, no 8, T.98 p.1283–1285, DOI:10.15199/62.2019.8.15 [journal indexed in JCR, IF = 0,485, 40 points – personal contribution 90%],
7. **Ciupek B.**, 2019, *Wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego na skład chemiczny spalin*, Przemysł Chemiczny, no 11, T.98 s.1768–1772, DOI:10.15199/62.2019.11.15 [journal indexed in JCR, IF = 0,485, 40 points – personal contribution 100%],
8. Judt W., **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2020, *Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber*, Energy, vol.196, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117093 [journal indexed in JCR, IF = 7,147, 200 points – personal contribution 10%],
9. **Ciupek B.**, 2020, *Badanie procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych wyposażonych w parową komorę dopalania*, Przemysł Chemiczny, no 8, T.99 p.1163–1168, DOI:10.15199/62.2020.8.9 [journal indexed in JCR, IF = 0,464, 40 points – personal contribution 100%],
10. Gołoś K., **Ciupek B.**, Judt W., Urbaniak R., 2021, *Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000-2020*, Przemysł Chemiczny, no 5, T.100 p.486–489, DOI:10.15199/62.2021.5.9 [journal indexed in JCR, IF = 0,464, 40 points – personal contribution 65%],

11. **Ciupek B.**, Judt W., Gołoś K., Urbaniak R., 2021, *Analysis of low-power boilers work on real heat loads: A case of Poland*, *Energies*, vol.14, no.11, s.3101–1–13, DOI:10.3390/en14113101 [journal indexed in JCR, IF = 3,004, 140 points – personal contribution 75%],
12. **Ciupek B.**, Gołoś K., Jankowski R., Nadolny Z., 2021, *Effect of hard coal combustion in water steam environment on chemical composition of exhaust gases*, *Energies*, vol. 14, no. 20, s. 6530–1–24, DOI:10.3390/en14206530 [journal indexed in JCR, IF = 3,004, 140 points – personal contribution 70%].

### 1.3 Abstract

The subject of the dissertation is related to the analysis of the possibility of improving the process of solid fuel combustion in low-temperature boilers by providing an additional thermodynamic factor to the process in the form of steam. The works carried out are of a cognitive and research character and their aim is to determine the impact of the supplied steam on the quality of the combustion process and to examine whether it is justified to use the supplied steam for the purpose of reducing the amount of harmful substances emitted from low-temperature boilers fired with solid fuels. In the research carried out, the effect of introducing superheated steam into the hard coal combustion process on the change of boiler emission parameters was shown. Analyzing the results obtained, it can be seen that the steam supplied to the hard coal combustion process significantly changed the chemical composition of flue gases: it caused a decrease in the mass concentration of emitted dust and soot (PM) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) with a simultaneous increase in the mass concentration of emitted carbon monoxide (CO). Tests were carried out on two objects: a boiler with automatic fuel feeding equipped with a single combustion chamber and a boiler equipped with a combustion chamber with an afterburning chamber above it. Apart from the measurement of mass concentrations of emitted harmful substances, the temperature prevailing in the combustion chamber, afterburning chamber, flue gas temperature and flue gas oxygen content were measured. Tests were carried out for steam injection into the combustion chambers and afterburning chamber at the rate of 0.7 kg/h and 3.6 kg/h for boiler operation at minimum power (30%) and nominal power (100%). A proprietary steamer with a superheated steam generation range of 0.7 kg/h to 3.6 kg/h was used for steam generation and

injection. Based on the results obtained, the efficiency of the combustion process was calculated for each configuration of boiler operation. The last practical aspect of the work, which at the same time is a novelty resulting from the completed research, is the development of a procedure algorithm for the supply of steam to the process of hard coal combustion in a heating boiler in order to minimize the amount of harmful substances emitted. The completed research has an applied character, which allows implementing the developed technologies in commercial solutions.

## **2. JUSTIFICATION OF THE SELECTED TOPIC**

In recent years, the problem of the quality of solid fuel combustion process in small power boilers has been increasingly raised in scientific discussion. This issue is a direct result of the growing public awareness of the environment and air quality. Air quality, especially in the heating period, is mostly influenced by individual heating sector. In Poland, the share of individual heating in relation to district heating is significantly higher. This is a direct consequence of the lack or poorly developed infrastructure for district heating, e. g. cogeneration. In the individual sector, the main source of heat is low-power boilers burning solid fuels. The popularity of these devices results from limited accessibility to the gas network and significantly lower prices of solid fuels and their dedicated boilers as compared to gas-fired devices. At the beginning of the 21st century, hard coal is still very popular in Poland. This is due to the habits of users of low-power heating equipment and the availability, easy storage and price of this fuel. The quality of the combustion process in a low-power boiler results directly from the design of the burner or furnace and the technical parameters of the fuel.

### **3. DEFINING THE RESEARCH PROBLEM, THESIS AND RESEARCH TASKS**

#### **3.1 Main research problem**

As a result of literature analysis and preliminary research, the main research problem was developed. The main research problem is to investigate the influence of the supplied steam to the combustion chamber of a solid fuel-fired boiler on the level of emitted harmful substances.

#### **3.2 Research thesis**

In relation to the solved research problem the following thesis was put forward: The introduction of water steam into the combustion process occurring in a solid fuel boiler can lead to its change and thus to the reduction of harmful substances produced during the combustion process.

#### **3.3 Research tasks**

In order to prove the above thesis and to solve the main research problem the following research tasks were set:

1. Development of a test method and a method for generating and delivering steam to the combustion and afterburning chamber of a heating boiler [7, 9, 12],
2. Development of a test stand and test layout [1–6, 7, 9, 12],
3. To investigate the effect of water steam supply to the combustion chamber and afterburning chamber of solid fuel heating boilers on the quality of the combustion process [7, 9–12],
4. Determination of limiting parameters for which it is justified to use a steam supply system for the process of solid fuel combustion in a heating boiler [1–5, 7–12],
5. Development of a procedure algorithm for the system: a heating boiler for solid fuels with steam supply to the combustion process [7, 9, 12].

## **4. RESEARCH RESULTS USED TO COMPLETE THE DISSERTATION**

### **4.1 Research and analysis of combustion process quality changes under the influence of supplied steam to Q EKO 15 boiler**

The tests for steam supply to the Q EKO 15 boiler were divided into six measurement cycles. In the first two test cycles, the heating device was tested for emissions without added steam. These studies were conducted for two powers: minimum and nominal. In the third and fourth cycle, tests were carried out for a boiler operating at minimum and nominal power with injection of 0.7 kg/h of steam into the combustion chamber. In the fifth and sixth cycle, tests were carried out for a boiler operating at minimum and nominal power with 3.6 kg/h injected into the combustion chamber.

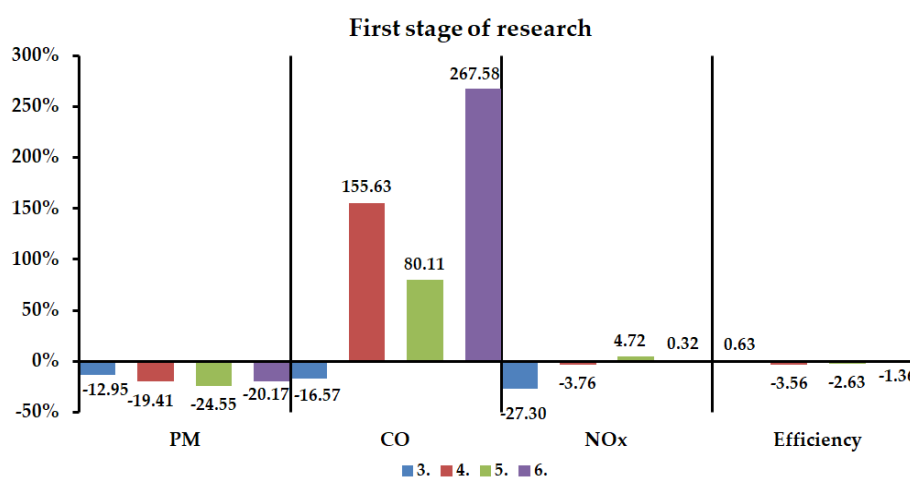
For the first and second test cycles, it was observed that CO emissions ranged on average from 100 mg/m<sup>3</sup> to 946 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> emissions ranged on average from 295 mg/m<sup>3</sup> to 443 mg/m<sup>3</sup> and for PM on average from 90 mg/m<sup>3</sup> to 103 mg/m<sup>3</sup>. Hydrogen emissions were trace (on average from 0.68 mg/m<sup>3</sup> to about 1.12 mg/m<sup>3</sup>) and could be due to the content of this substance in the fuel. The efficiency of the combustion process ranged on average from about 87% to about 91%. Based on the results obtained, it can be seen that the boiler meets class 3 according to the PN-EN 303-5:2012 standard, which defines the limit values of CO and PM emissions from the combustion of fossil fuels for boilers with a rated thermal power ≤ 50 kW with automatic feeding, which are 3000 mg/m<sup>3</sup> for CO and 150 mg/m<sup>3</sup> for PM, respectively.

For the third and fourth test cycle, it was observed that the introduction of steam at a rate of 0.7 mg/m<sup>3</sup> into the boiler combustion chamber caused a decrease in CO emissions by about 17% for boiler operation at minimum power while for boiler operation at nominal power it increased the amount of emitted CO by about 156%. Dust emissions decreased in relation to normal boiler operation from about 13% to 19% regardless of boiler power. NO<sub>x</sub> emissions decreased by about 4% to 27% regardless of the boiler output. Hydrogen was detected in the exhaust gas at an average of about 5.62 mg/m<sup>3</sup> to 8.87 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process decreased by a maximum of about 4%. When steam was supplied to the combustion chamber, it was ob-

served that the flue gas temperature was reduced by about 15°C and the temperature inside the combustion chamber was reduced by about 46°C, which had a beneficial effect on reducing the amount of NO<sub>x</sub> formed during the thermal processes.

For the fifth and sixth test cycles, it was observed that the amount of CO emitted relative to the standard combustion process increased on average from about 80% to 268%. The introduction of steam into the combustion process reduced PM emissions by an average of about 20% to 25%. Nitrogen oxides emissions relative to emissions from the unmodified combustion process increased by a maximum of about 5%. The reason for the increase in nitrogen oxides emitted may have been the additional energy introduced with the maximum amount of water vapor fed into the combustion. The efficiency of the combustion process decreased by about 3% on average. Hydrogen was detected in the exhaust gas ranging from 5.25 mg/m<sup>3</sup> to about 18.38 mg/m<sup>3</sup>. The average flue gas temperature for the combustion process with 3.6 kg/h of steam added was 30°C lower, and the temperature in the combustion chamber decreased by about 86°C.

Figure 19 graphically presents changes in the emissions of harmful substances and in the combustion process efficiency related to the supply of steam to the combustion chamber at different outputs.



**Figure 19** Change of emission parameters and combustion process efficiency obtained for the first stage of research



## **4.2 Research and analysis of combustion process quality changes under the influence of supplied steam to KN-20 boiler**

The tests for steam supply to the KN-20 boiler were divided into six measurement cycles. In the seventh and eighth test cycles, the heating device was tested for emissions without added steam. These studies were conducted for two powers: minimum and nominal. In the ninth and tenth cycle, tests were carried out for a boiler operating at minimum and nominal power with 0.7 kg/h of steam injected into the combustion chamber. In the eleventh and twelfth cycle tests were conducted for a boiler operating at minimum and nominal power with injection into the combustion chamber of 3.6 kg/h. In the thirteenth and fourteenth cycle tests were conducted for a boiler operating at minimum and nominal power with injection into the afterburning chamber of 0.7 kg/h of steam. In the fifteenth and sixteenth cycle, tests were carried out for a boiler operating at minimum and nominal power with an injection of 3.6 kg/h into the afterburning chamber.

For the seventh and eighth test cycles, it was observed that CO emissions ranged on average from 58 mg/m<sup>3</sup> to 516 mg/m<sup>3</sup> while, NO<sub>x</sub> emissions ranged on average from 285 mg/m<sup>3</sup> to 479 mg/m<sup>3</sup>. Dust emissions averaged between 93 mg/m<sup>3</sup> and 112 mg/m<sup>3</sup>. Hydrogen emissions were in the range of up to 8 mg/m<sup>3</sup> on average. The efficiency of the combustion process ranged on average from about 90% to 95%.

For the ninth and tenth test cycle, it was observed that the introduction of steam at a rate of 0.7 kg/h into the boiler combustion chamber caused an increase in the amount of CO emitted by about 58% in the case of boiler operation at nominal power, while a slight increase was observed at minimum power. Dust emissions decreased in relation to normal boiler operation by about 17% for minimum power operation and by about 19% for nominal boiler power. Nitrogen oxides emissions decreased by about 12% for boiler operation at minimum power and by about 17% for operation at nominal power. Hydrogen was detected in the exhaust gas at an average of about 3.46 mg/m<sup>3</sup> to 4.83 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process increased by a maximum of about 2%. During the supply of steam to the combustion chamber of the KN-20 boiler, an increase in flue gas temperature by about 8°C maximum was observed as well as an increase in the

temperature in the combustion chamber by about 26°C maximum. The temperature in the afterburning chamber increased by about 5°C maximum.

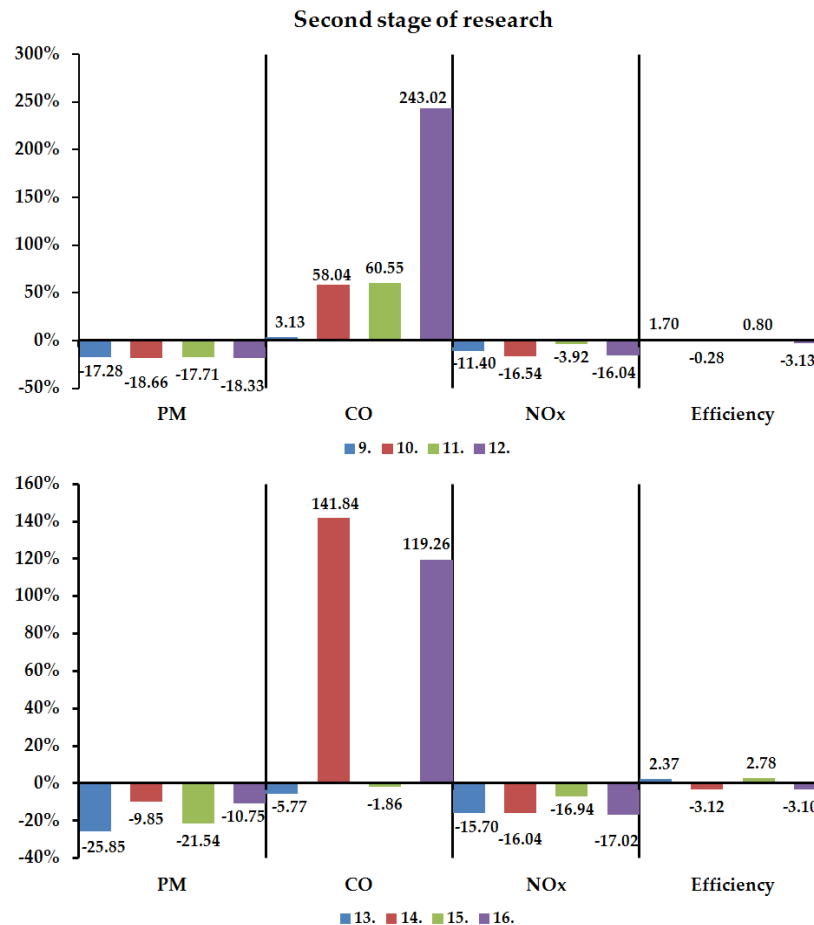
For the eleventh and twelfth test cycles, it was observed that the introduction of steam at a rate of 3.6 kg/h into the boiler combustion chamber increased the amount of CO emitted from about 61% to about 243%. Dust emissions decreased in relation to normal boiler operation by about 18% regardless of boiler power. Nitrogen oxides emissions decreased from about 4% to 16%. Hydrogen was detected in the exhaust gas at an average of about 8.02 mg/m<sup>3</sup> to 9.17 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process in the case of boiler operation at nominal output decreased by about 3% and in the case of operation at minimum output did not change. During the supply of steam at an output of 3.6 kg/h to the combustion chamber of the KN-20 boiler, an increase in flue gas temperature by about 30°C and in the combustion chamber by about 48°C was observed. The temperature in the afterburning chamber increased by about 32°C.

For the thirteenth and fourteenth test cycles, it was observed that the introduction of steam at a rate of 0.7 kg/h into the boiler afterburning chamber caused a decrease in the amount of CO emitted to about 6% and for the nominal power the CO emission increased by about 142%. Dust emissions decreased in relation to normal boiler operation by about 26% for boiler operation at minimum power and decreased by about 10% for operation at nominal power. Nitrogen oxides emissions have decreased from about 16%. Hydrogen was detected in the exhaust gas at an average of about 5.34 mg/m<sup>3</sup> to 8.02 mg/m<sup>3</sup>. The combustion efficiency for boiler operation at minimum power increased by about 2% and for operation at minimum power decreased by about 3%. During the supply of steam at a rate of 0.7 kg/h to the afterburning chamber of the KN-20 boiler, an increase in flue gas temperature by about 25°C and in the combustion chamber by about 20°C was observed. The temperature in the afterburning chamber increased by about 35°C. The temperature in the afterburning chamber increased by about 28°C.

For the fifteenth and sixteenth test cycles, it was observed that the introduction of steam at a rate of 3.6 kg/h into the boiler afterburning chamber increased the amount of CO emitted by about 119% for boiler operation at nominal power, while in the case of boiler operation at minimum power, CO emissions decreased by about 6%. Dust emis-

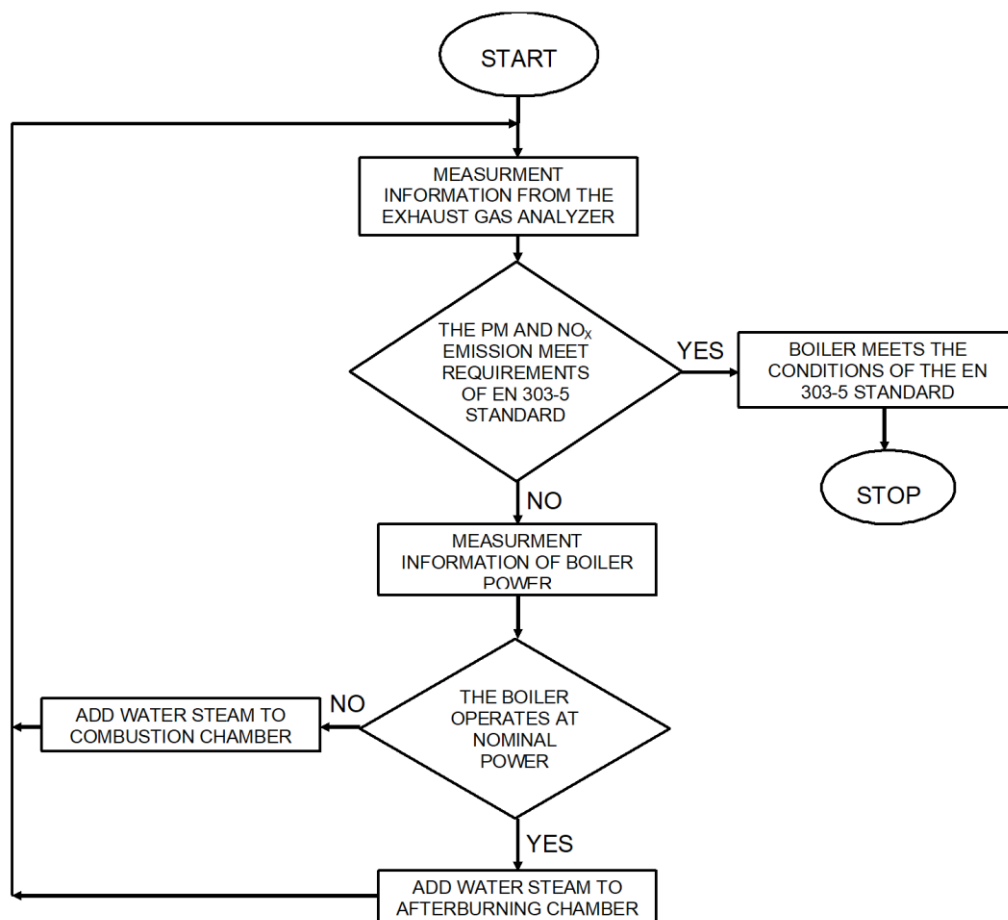
sions decreased in relation to normal boiler operation by about 18% regardless of boiler power. Nitrogen oxides emissions have decreased from about 17%. Hydrogen was detected in the exhaust gas at an average of about 7.06 mg/m<sup>3</sup> to 9.75 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process for boiler operation at nominal power decreased by about 3% and for operation at minimum power increased by about 2%. An increase of approx. 45°C in flue gas temperature and approx. 52°C in combustion chamber was observed during supplying 3.6 kg/h of steam to afterburning chamber of KN-20 boiler

Figure 20 show graphically the changes in harmful substances emissions and combustion efficiency related to the supply of steam to the combustion chamber and afterburning chamber at different rates.



**Figure 20** Change of emission parameters and combustion process efficiency obtained for the second stage of tests with steam supply to the combustion and afterburning chamber

Based on the analysis of the research, an algorithm has been developed for the supply of water steam to the hard coal combustion process in low power heating boilers equipped with an afterburning chamber. It was observed that the higher the mass flux of steam supplied to the combustion process, the higher the CO emission (31% – 90%) relative to standard boiler operation. In the case of PM emissions, there was a sharp decrease in emissions (12% – 25%), while for NO<sub>x</sub> emissions decreased insignificantly (2% – 5%) with respect to normal boiler operation. This effect may be due to the occurrence of the chemical reactions discussed in the introduction, which can be confirmed by a sharp increase in CO and H<sub>2</sub> emissions. When steam was added to the afterburning chamber, no significant increase in CO emissions was observed, but a beneficial reduction of PM (about 20%) and NO<sub>x</sub> (about 7%) was obtained relative to standard boiler operation. The algorithm of the procedure for supplying steam to the combustion process of coal fuel in a low power boiler is presented in Figure 21.



**Figure 21** Diagram of an algorithm for a solid fuel boiler system with water steam supply to reduce emissions of harmful substances

## 5. FINAL CONCLUSIONS

A study was conducted on the combustion of carbon fuel in a steam atmosphere. Two boilers were used: the first one being a classic heating boiler fuelled by coal and the second one having a steam afterburning chamber. Depending on the boiler configuration, steam was supplied to both the combustion chamber and the afterburning chamber. Tests performed confirmed that the introduction of steam within the combustion chamber and afterburning chamber causes a decrease in PM emissions and, depending on the steam mass flux and boiler power, an increase in CO emissions. In the case of nitrogen oxide emissions, decreases ranging from a few to several percent were most frequently observed. Considering that the main source of nitrogen oxides formation from low power boilers is the fuel mechanism, it is reasonable to believe that the addition of water vapor within the combusted fuel alters the chemistry of the combustion process. Adding steam to the afterburning chamber has a beneficial effect on the boiler emission characteristics from the point of view of emitted dusts. The study shows that the level of dust and nitrogen oxides neutralization is similar to that achieved when steam is supplied to the combustion chamber, but the increase in carbon monoxide emission is much higher than in the case of steam supply to the afterburning chamber. The basis of the research carried out was the desire to confirm earlier studies on the possibility of reducing emissions of harmful substances by using steam in heating boilers for solid fuels. The chemical reaction  $C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO + H_2$ , which results in the oxidation of elemental carbon, e. g. carbon black, was the theoretical basis for the study. The carbon monoxide content formed during the chemical reaction was slightly reduced in the afterburning chamber, with a significant reduction in the content of emitted dust. The effects of changing the combustion process chemistry obtained during the research are satisfactory, which may encourage the spread of this technology among solid fuel boiler manufacturers. The application of the technology of water steam supply to the afterburning chamber of the heating boiler makes it possible to reduce the amount of emitted dust, which has a favorable influence on the improvement of the boiler ecological parameters. One of the premises for further research work is to assess the possibility of producing and dispensing water mist produced by ultrasonic methods, such systems consume significantly less electricity to produce the thermodynamic factor in the form of suspension of water particles in air and eliminate the need to design a pressure vessel.

When considering the merits of modifying boilers that do not meet current Polish and EU flue gas purity regulations, one of the options to improve their emission parameters and to meet the applicable standards is to modify their construction to provide them with an additional afterburning chamber.

**The results of the analysis of possibilities to improve the combustion process of solid fuels in low-power boilers with the use of steam, presented within the framework of the dissertation, allowed to develop an algorithm that allows to design an effective system of supplying an additional thermodynamic factor (steam) to the combustion process improving the combustion process, which proves the scientific thesis.**

## **6. SYNTHETIC APPROACH TO THE CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF A SCIENTIFIC DISCIPLINE: MACHINE DESIGN AND EXPLOATATION – MECHANICAL ENGINEERING**

The work completed within the framework of the doctoral dissertation entitled "**Analysis of the possibility of improving the combustion process of solid fuels in low power boilers with the use of water steam**" is a theoretical analysis of the impact of the introduction of steam to the combustion process and the impact of this action on the quality of the combustion process (analysis of the chemical composition of flue gases). The theoretical analysis was supported by experimental tests conducted on two research objects in three technical configurations for two heating powers (16 test cycles). Completed research work is focused on improving the quality of the combustion process taking place in heating boilers for solid fuels (mainly fuelled by coal) in order to reduce the amount of harmful substances emitted into the environment. Synthesizing, the completion of the dissertation made it possible to:

- designing a steam generation facility in accordance with applicable laws and regulations,
- construction of a test stand with a model of a steam generator adapted to domestic use, for the purpose of carrying out experimental research,
- performing experimental tests for a boiler of standard construction (most often used in households) for operation without and with supplied steam,
- experimental tests for a boiler of modern construction (with an additional after-burning chamber implemented) for operation without and with supplied steam,
- analysis of the obtained results to find an optimum configuration of the boiler operation with water steam supply in order to reduce the amount of harmful substances emitted,
- development of a model (operating algorithm) to reduce the amount of pollutants emitted using steam added to the combustion process.

## **7. SUMMARY OF SCIENTIFIC AND RESEARCH ACHIEVEMENTS**

Table 11 presents the quantitative scientific and research achievements. To assess the scientific and research achievements, the model used in the evaluation for the years 2017-2021 was used. This means that the points for the research papers published in 2019-2021 were calculated on the basis of the current list of the Polish Ministry of Science and Higher Education published on July 31, 2019, while the number of points for publications published in 2018 was calculated on the basis of the unified list of journals of the Polish Ministry of Science and Higher Education, which was in force in years 2013-2016. For the peer-reviewed conference materials indexed in Thomson Reuters® Web of Science® and Scopus® from 2019-2021, scores were adopted in accordance with the chapters in the monograph and points inheritance from the list of publications of the Polish Ministry of Science and Higher Education published on July 31, 2019. To evaluate the achievements, bibliographic indicators in the form of the number of citations and the Hirsch index from the three most popular databases were used: Thomson Reuters® Web of Science®, Scopus® and Google Scholar, as well as the Impact Factor. In the case of projects and patent applications, a quantitative indicator was used. The academic achievements were divided in the table into two parts, the first of which concerns the Main Scientific Achievement, and the second relates to additional scientific activities. The last column also presents the total value of points or bibliographic and quantitative indicators. The table divides points into the so-called "old" (2018), which include publications from 2018 and reviewed conference materials indexed in Thomson Reuters® Web of Science® and Scopus® and "new" (2019-2021) which include publications from the years 2019-2021, conference materials from 2019-2021.



**Table 11** Quantitative summary of scientific and research achievements

	Main Scientific Achievement	Points	Additional scientific activities	Points	Sum of points/ quantitative indicators
Number of research papers in scientific journals distinguished in Journal Citation Reports®	7	0 (2018) 640 (2019-21)	2	0 (2018) 180 (2019-21)	0 (2018) 820 (2019-21)
Number of research papers in peer-reviewed conference materials indexed in Thompson Reuters® Web of Science® or Scopus®	1	0 (2018) 5 (2019-21)	3	0 (2018) 15 (2019-21)	0 (2018) 20 (2019-21)
Number of other research paper	4	40 (2018) 0 (2019-21)	8	33 (2018) 130 (2019-21)	73 (2018) 130 (2019-21)
Number of patent applications	0	–	4	–	4
Number of R+D projects	0	–	18	–	18
Number of citations – Web of Science®	17	–	12	–	29
Hirscha Index – Web of Science®	2	–	+2	–	4
Number of citations – Scopus®	5	–	+9	–	14
Hirsch Index – Scopus®	1	–	+2	–	3
Number of citations – Google Scholar®	44	–	14	–	58
Hirsch Index – Google Scholar®	3	–	+1	–	4
Total Impact Factor	15.053	–	3.468	–	18.521
Total points	–	40 (2018) 645 (2019-21)	–	33 (2018) 325 (2019-21)	73 (2018) 970 (2019-21)
Total points (personal contribution)	–	33.00 (2018) 369.50 (2019-21)	–	24.23 (2018) 158.75 (2019-21)	57.23 (2018) 528.25 (2019-21)

# Załącznik 1

1. Kopia dyplomu uzyskania tytułu zawodowego magistra inżyniera.

# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Maszyn Roboczych i Transportu



## DYPLOM

nr 76921

ukończenia studiów drugiego stopnia ..... w formie stacjonarnej  
poziom studiów



**Bartosz Jan CIUPEK**  
imię i nazwisko

urodzony/a dnia 24 czerwca 1993 r. w Poznaniu  
uzyskał/a w dniu 22 czerwca 2017 r. tytuł zawodowy magistra inżyniera  
z wynikiem dobrym plus  
na kierunku mechanika i budowa maszyn  
w specjalności energetyka cieplna  
w obszarze kształcenia nauk technicznych  
o profilu kształcenia ogólnoakademickim

częć  
urzędowa

*Bartosz Ciupek*

podpis posiadacza dyplomu

Poznań, dnia 05 lipca 2017 r.

miejsowość i data wydania dyplomu

Dziekan

*Franciszek Tomaszewski*

prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski

pieczęć imienna i podpis



pieczęć urzędowa uczelni

Rektor

*dr hab. Jacek GOC*  
prof. dr hab. inż. Jacek GOC

pieczęć imienna i podpis

WYDANY W RZECZYSPOLITEJ POLSKIEJ

# Załącznik 2

1. Kopie publikacji wraz z oświadczeniami autorów stanowiące osiągnięcie naukowe.

# Emisja tlenku węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego

*Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides From a Low Power Boiler Depending on the Coal Fuel Used*

DOI: 10.15199/9.2018.3.2

BARTOSZ CIUPEK  
RAFAŁ URBANIAK  
JAROSŁAW BARTOSZEWICZ

**Słowa kluczowe:** kotły małej mocy na paliwa stałe, paliwo węglowe, badanie emisji, tlenek węgla, tlenki azotu

## Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę emisji tlenku węgla i azotów z kotła wodnego małej mocy opalanego różnymi paliwami węglowymi. Kocioł, przedstawiony do badań spełniał warunki emisji dla kotłów wykonanych w klasie piątej zgodnie z normą PN-EN 303-5:2012. Obiekt badawczy posiadał palnik z automatycznym podawaniem paliwa, sterowany przy pomocy mikroprocesorowego regulatora temperatury. Celem badań było sprawdzenie czy kocioł spełni posiadaną najwyższą klasę ekologiczności bez względu na jakość i parametry techniczne zastosowanego paliwa. W artykule opisano metodologię badań oraz analizę otrzymanych wyników. Efektem przeprowadzonych badań jest zestawienie średnich wartości emisji tlenku węgla oraz tlenków azotu w zależności od zastosowanego paliwa. Wyniki badań stanowią przesłankę do dalszej pracy badawczej pod kątem wpływu zastosowanego paliwa na emisję substancji szkodliwych.

**Keywords:** low-power boilers for solid fuels, coal fuel, emission test, carbon monoxide, nitrogen oxides

## Abstract

The article presents an analysis of the emission of carbon monoxide and nitrogen oxides from a low power boiler fired with various coal fuels. The boiler, presented for testing, met the emission conditions for boilers made in the fifth class in accordance with the PN-EN 303-5: 2012 standard. The research object had a burner with automatic fuel supply controlled by a microprocessor temperature controller. The purpose of the tests was to check whether the boiler fulfills its highest environmental class regardless of the quality and technical parameters of the fuel used. The article describes the research methodology and analysis of the results obtained. The effect of the tests carried out is a comparison of average values of carbon monoxide and nitrogen oxides emissions depending on the fuel used. The results of the tests constitute a premise for further research work in terms of the impact of the used fuel on the emission of harmful substances.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
All right reserved

## 1. Wstęp

Podstawowym zadaniem stawianym kotłom energetycznym jest konwersja energii chemicznej paliwa w energię cieplną. Jednym z elementów towarzyszącym procesowi spalania w kotle jest emisja spalin. Spaliny, jako produkt reakcji gwałtownego utleniania cząsteczki węgla w otoczeniu tlenu składają się z wielu związków chemicznych w tym substancji szkodliwych.

Wiele z powstających produktów spalania ma negatywny wpływ na funkcjonowanie organizmu człowieka i otaczające go środowisko. Podstawowymi nieprzyjawnymi

ludziom i środowisku substancjami gazowymi emitowanymi przez kotły opalane węglem są: tlenek węgla (CO) i tlenki azotu (NO<sub>x</sub>). Tlenek węgla potocznie zwany czadem jak i tlenki azotu mają negatywny wpływ na układ krążeniowo-oddechowy człowieka. Gazy te w dużym stężeniu mogą powodować nieodwracalne zmiany w tkankach jak również doprowadzić do śmierci.

Od niedawna widzimy wzmożony ruch na krajowym rynku kotlarskim wynikający z wprowadzanych zmian w przepisach dotyczących efektywności energetycznej kotłów oraz emisji zanieczyszczeń. Branża kotlarska jest sektorem produkcji urządzeń energetycznych, która w ostatnim czasie uległa wielu ostrym obostrzeniom dotyczącym wytwarzanych produktów. [1] Śledząc trendy rozwojowe konstrukcji dostępnych na rynku widzimy, że wymagania stawiane kotłom spowodowały, iż wielu producentów wyczołgało się z produkcji kotłów zasypowych starszej generacji na rzecz rozwiązań z automatycznym podawaniem paliwa. (por.[2],[3]) W sektorze tym wiodącym liderem są kotły z podajnikiem automatycznym zaopatrzone w palnik

mgr inż. **Bartosz Ciupek**,  
dr inż. **Rafał Urbaniak**; osoba do kontaktu:  
rafal.urbaniak@put.poznan.pl,  
dr hab. inż. **Jarosław Bartoszewicz** prof. PP  
Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Maszyn Roboczych  
i Transportu,  
Politechnika Poznańska

retortowy. Większość wytwórców posiada już w swojej ofercie tego typu kotły.

Od 1 października 2017 roku w świetle obowiązujących przepisów kotłami niskotemperaturowymi na paliwo stałe, które wolno produkować, są urządzenia spełniające warunki piątej klasy zgodnie z normą PN-EN 303-5:2012. Fakt ten wynika z wejścia w życie Rozporządzenia Ministra Rozwoju i Finansów regulującego wymagania stawiane kotłom. [1] Przepisy te spowodowały, iż wiele konstrukcji funkcjonujących na rynku musiało zostać dostosowanych i przebadanych pod kątem ich emisyjności. Część z nich przeszła badania pomyślnie, pozostałe musiały zostać przekonstruowane i dostosowane do aktualnych wymagań. Ponadto, wszystkie nowe konstrukcje wprowadzane na rynek podlegają procesowi badania ich emisji i efektywności energetycznej. Celem tych działań jest sklasyfikowanie urządzenia zgodnie z normą oraz dopuszczenie go do sprzedaży.

Na pomyślnie przejście kotła przez badania, ma wpływ nie tylko jego konstrukcja i parametry techniczne ale również zastosowanie odpowiedniego jakościowo paliwa. Rozporządzenie regulujące wymagania emisyjne stawiane kotłom niskotemperaturowym wprowadzono bez dodatkowego obostrzenia dla paliw węglowych w sortymencie groszek. Powoduje to, że wiele konstrukcji najwyższej piątej klasy, przy zastosowaniu gorszego jakościowo paliwa, może jednak nie spełniać tych warunków. Paradoksalnie, problemu z nadmierną emisją substancji szkodliwych, upatruje się w konstrukcji kotła a nie w jakości dostarczanego paliwa. Na rynku węgla dostępna jest duża ilość typów paliw oferowanych przez wielu producentów. Można zakupić paliwo o różnej kaloryczności w zależności od ceny jaką użytkownik chce przeznaczyć na opał. Innym ważnym parametrem jest wilgotność paliwa. Nadmierna wilgotność wpływa na pogorszenie procesu spalania poprzez obniżenie temperatury spalin spowodowane odebraniem z nich pewnej ilości ciepła, niezbędnej do odparowania wody. Obniżenie temperatury ma bezpośredni wpływ na zwiększenie zużycia paliwa przez kocioł i może powodować wystąpienie korozji kotła oraz układu kominowego nieprzystosowanego do wytrącania się kondensatu.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie czy kocioł węglowy posiadający piątą klasę według normy PN-EN 303-5:2012 spełnia te wymagania bez względu na jakość zastosowanego w nim paliwa węglowego. Do badań zastosowano paliwa węglowe, workowane, ogólnie dostępne na rynku paliw. Otrzymane wyniki z badań zestawiono z aktualnie obowiązującymi przepisami dotyczącymi emisji z kotłów czyli zgodność z wyżej wymienioną normą oraz Rozporządzeniem delegowanym Komisji (UE) 2015/1189 dotyczącym wymogów dla kotłów na paliwa stałe mające spełniać warunki ekoprojektu. Norma stawia znajdującym się w piątej klasie kotłom z automatycznym podawaniem paliwa wymóg spełnienia emisji tlenków węgla na poziomie mniejszym niż  $500 \text{ mg/m}^3$  dla 10% tlenu jako średniej arytmetycznej z całego okresu badania. (por.[5]) W przypadku tlenków azotu parametr ten nie jest obojętny przez normę, zaleca się jednak jego rejestrację. W przypadku Rozporządzenia Komisji Europejskiej w sprawie ekoprojektu kotłów, emisja tlenków azotu dla paliw kopalnych nie powinna być wyższa niż  $350 \text{ mg/m}^3$  dla 10% tlenu. (por.[8]) W przebiegu całego eksperymentu zastosowano te parametry jako graniczne. Przyjęto, że średnia arytmetyczna emisji CO jaki i  $\text{NO}_x$  z całego cyklu badania nie powinna przekraczać tych wartości.

## 2. Metodyka badań

Do badań wytypowano kocioł stalowy wodny niskotemperaturowy o mocy znamionowej 20 kW, sklasyfikowany jako kocioł piątej (najwyższej) klasy i spełniający wymogi normy PN-EN 303-5:2012. Urządzenie to zaopatrzone było w palnik retortowy z automatycznym podawaniem paliwa. Obiekt badawczy zbudowany był z czterech ciągów spalin wraz z płaszczem wodnym. Ujście spalin w postaci czopucha zostało połączone z kominem pomiarowym wykonanym zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12809:2002. (por.[6]). Moc kotła była mierzona metodą pośrednią po stronie wody. Do obliczeń mocy kotła posłużono się stanowiskiem badawczym zaopatrzonym w płytowy wymiennik ciepła, przepływomierz oraz króćce pomiarowe z termoparami do pomiaru temperatury wody na wejściu i wyjściu z kotła. W trakcie całych badań zmieniany był załadunek paliwa oraz ustawienia sterownika pracy kotła w celu utrzymania jednakowych parametrów pracy. Zmianom podlegał czas podawania paliwa, przerwa podawania oraz siła nadmuchu. Zmiany te warunkują możliwość utrzymania jednakowej mocy przy użyciu różnie kalorycznych paliw. Nie ingerowano w konstrukcję kotła.

Przed rozpoczęciem badań przeprowadzono analizę rynku a następnie wytypowano kilka paliw które zostały przebadane pod kątem ich parametrów użytkowych. Wśród nich do dalszych badań wytypowano cztery paliwa węglowe sortymentu groszek. W wyborze paliwa kierowano się parametrem wartości opałowej, który to parametr warunkuje cenę paliwa. Każdy z wybranych węgla był paliwem workowanym, o średniej masie worka ok. 25 kg. Wytypowano paliwo o wartości opałowej rzędu około  $19 \text{ MJ/kg}$  (Paliwo 1) określone przez producenta jako „młody węgiel kamienny”. Kolejne trzy paliwa to węgle kamienne o następujących kalorycznościach: około  $21 \text{ MJ/kg}$  (Paliwo 2),  $25 \text{ MJ/kg}$  (Paliwo 3) oraz  $28 \text{ MJ/kg}$  (Paliwo 4).

Wszystkie z wybranych paliw zostały przed badaniami ustabilizowane w jednakowych warunkach laboratoryjnych. Czas stabilizacji trwał dwa dni. Po okresie tym przeprowadzono badania eksperymentalne. W przypadku dwóch pierwszych paliw stwierdzono rażącą ilość wilgoci. W trakcie procesu stabilizacji paliwa z warunkami otoczenia obydwu paliwa straciły około 3 kg masy własnej co daje 12% utraty masy zakupionej paliwa. W przypadku obu paliw było widoczne duże ich dowilżenie. Pozostałe paliwa ( $25$  i  $28 \text{ MJ/kg}$ ) straciły około 6% wilgoci co mieściło się w zakresie podanym przez producentów.

W przeprowadzeniu eksperymentu posłużono się metodyką badań kotłów opisaną w normie PN-EN 303-5:2012. Przez cały okres pomiarów były utrzymywane stałe parametry pracy kotła tj. pracował z mocą nominalną deklarowaną przez producenta. Temperatura wody na wyjściu wynosiła średnio  $75^\circ\text{C}$  a na powrocie średnio  $65^\circ\text{C}$ , różnica temperatur była utrzymywana na poziomie  $10^\circ\text{C}$ . W trakcie badań utrzymywano jednakowe warunki środowiskowe. Do pomiaru emisji wybranych parametrów spalin posłużono się analizatorem spalin z możliwością pracy ciągłej. Lanca poboru spalin była zamontowana na stałe w kominie pomiarowym a rejestracja wybranych parametrów odbywała się poprzez analizator spalin w dedykowanym programie rejestrującym. Pomiaru dla pojedynczego paliwa trwały 6 godzin. Zebrane parametry zostały przeliczone z wartości mierzonych w ppm na wartości w  $\text{mg/m}^3$  dla 10%  $\text{O}_2$  co jest zgodne z normą PN-EN 303-5:2012 (poz. [5]) jak i dyrektywą unijną (UE) 2015/1189 (poz. [8]).

### 3. Analiza wyników

W celu ułatwienia interpretacji otrzymanych wyników badań przedstawionych na wykresach, zastosowano jednolity system oznaczeń rejestrowanych parametrów. System ten został przedstawiony na rys. 1.

- zawartość O<sub>2</sub> [%]
- emisja CO [mg/m<sup>3</sup> dla 10% O<sub>2</sub>]
- emisja NO<sub>x</sub> [mg/m<sup>3</sup> dla 10% O<sub>2</sub>]

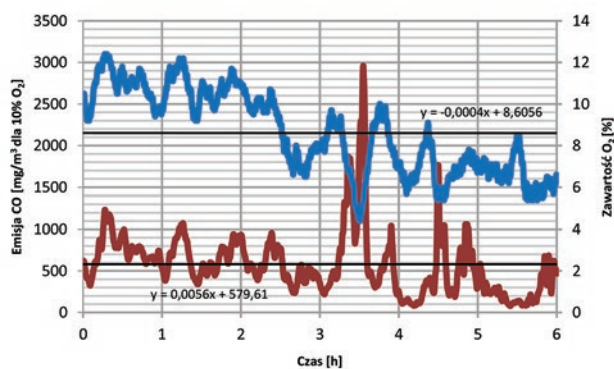
Rys. 1. Oznaczenia na wykresach

W pierwszym etapie rozpalono kocioł przy wykorzystaniu najmniej energetycznego paliwa. Dostosowano parametry pracy kotła do uzyskania mocy znamionowej, następnie stabilizowano pracę kotła. Po ustabilizowaniu pracy kotła przeprowadzono rejestrację otrzymanej emisji. Powyższy cykl zmiany paliwa, stabilizacji pracy kotła do uzyskania żądanych parametrów pracy oraz rejestracji emisji przeprowadzono w przypadku każdego z czterech badanych paliw.

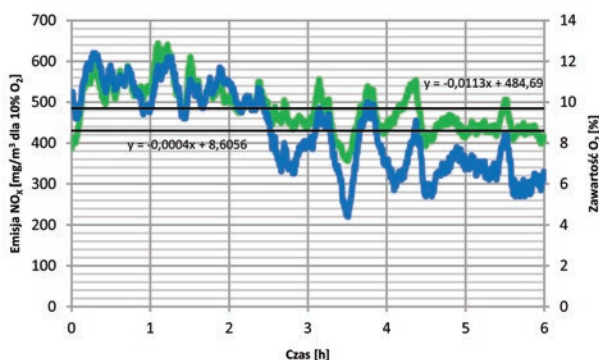
Po pierwszym cyklu załadunkowym Paliwa 1 (średnia wartość opałowa 19 MJ/kg) zestawiono otrzymane wyniki do pozostałości tlenu w spalinach oraz obliczono średnią arytmetyczną zawartości tlenu w spalinach. Otrzymane średnie arytmetyczne emisje i zawartości tlenu w spalinach przedstawiono w tab. 1, natomiast przebiegi emisji substancji szkodliwych zaprezentowano na rys. 2 i 3.

TABELA 1. Średnia arytmetyczna otrzymanych parametrów emisji spalin – Paliwo 1

Paliwo 1	
Parametr	średnia emisja (mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub> )
CO	517,78
NO <sub>x</sub>	484,90
O <sub>2</sub>	8,29%



Rys. 2. Przebieg emisji tlenku węgla (CO) w czasie – Paliwo 1

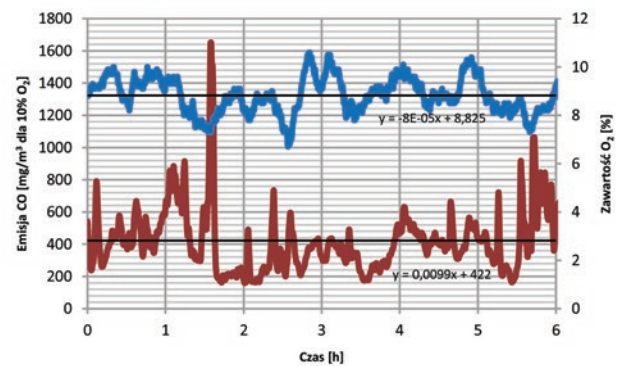


Rys. 3. Przebieg emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w czasie – Paliwo 1

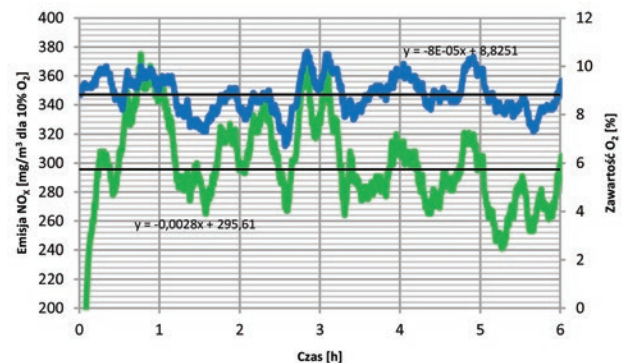
Po zakończeniu pierwszego etapu pomiarowego zmieniono zasyp paliwa na Paliwo 2 (średnia wartość opałowa 21 MJ/kg) przeprowadzono stabilizację parametrów pracy kotła i po ich ustabilizowaniu przeprowadzono rejestrację. Otrzymane średnie arytmetyczne emisje i zawartości tlenu w spalinach przedstawiono w tab. 2 natomiast przebiegi emisji substancji szkodliwych zaprezentowano na rys. 4 i 5.

TABELA 2. Średnia arytmetyczna otrzymanych parametrów emisji spalin – Paliwo 2

Paliwo 2	
Parametr	średnia emisja (mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub> )
CO	415,83
NO <sub>x</sub>	296,78
O <sub>2</sub>	8,82%



Rys. 4. Przebieg emisji tlenku węgla (CO) w czasie – Paliwo 2

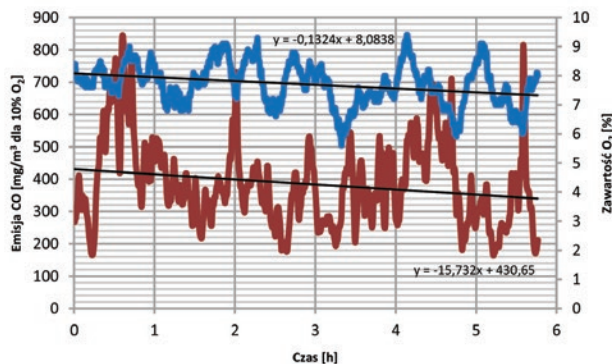


Rys. 5. Przebieg emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w czasie – Paliwo 2

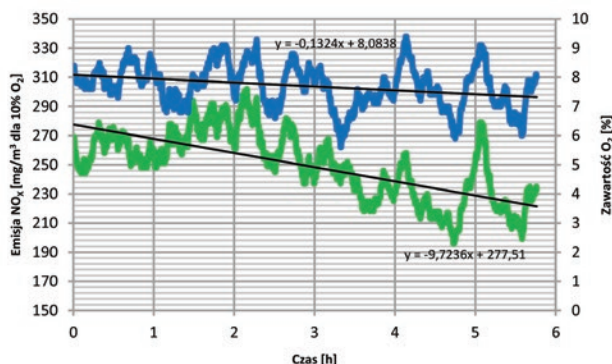
Trzecim etapem przeprowadzanych badań była zmiana załadunku kotła na Paliwo 3 (średnia wartość opałowa 25 MJ/kg). Po ustabilizowaniu pracy kotła na tym paliwie przeprowadzono trzecią rejestrację emisji z kotła. Otrzymane średnie arytmetyczne emisje i zawartości tlenu w spalinach przedstawiono w tab. 3 natomiast przebiegi emisji substancji szkodliwych zaprezentowano na rys. 6 i 7.

TABELA 3. Średnia arytmetyczna otrzymanych parametrów emisji spalin – Paliwo 3

Paliwo 3	
Parametr	średnia emisja (mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub> )
CO	385,30
NO <sub>x</sub>	249,48
O <sub>2</sub>	7,70%



Rys. 6. Przebieg emisji tlenku węgla (CO) w czasie – Paliwo 3

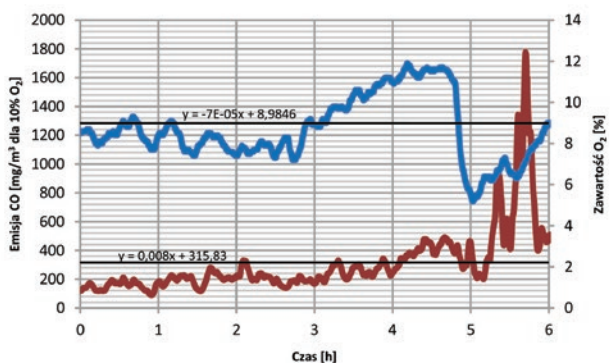


Rys. 7. Przebieg emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w czasie – Paliwo 3

Ostatnim etapem badań było przebadanie emisji spalin z kotła przy spalaniu w nim Paliwa 4 (średnia wartość opałowa 28 MJ/kg). Otrzymane wyniki i przebiegi emisji zaprezentowano w tab. 4 oraz na rys. 8 i 9.

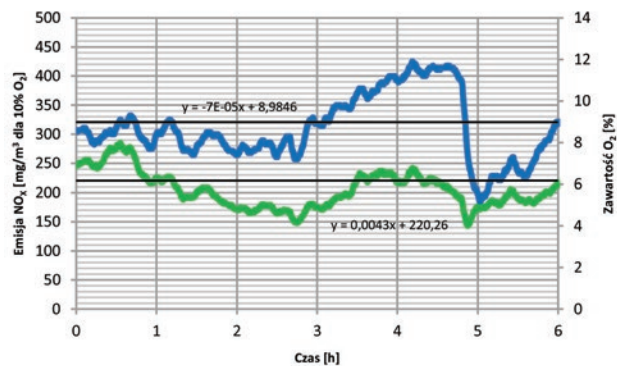
TABELA 4. Średnia arytmetyczna otrzymanych parametrów emisji spalin – Paliwo 4

Paliwo 4	
Parametr	średnia emisja (mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub> )
CO	309,39
NO <sub>x</sub>	204,43
O <sub>2</sub>	8,68%



Rys. 8. Przebieg emisji tlenku węgla (CO) w czasie – Paliwo 4

Otrzymane z czterech cykli pomiarowych wyniki emisji tlenku węgla i tlenków azotu przy zastosowaniu poszczególnych paliw zestawiono w tabeli zbiorczej 5.



Rys. 9. Przebieg emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w czasie – Paliwo 4

TABELA 5. Zestawienie średnich arytmetycznych emisji spalin oraz zawartości tlenu w spalinach poszczególnych paliw

Parametr	Jednostka miary	Paliwo 1	Paliwo 2	Paliwo 3	Paliwo 4
CO	mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub>	517,78	415,83	385,30	309,39
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> dla 10% O <sub>2</sub>	484,90	296,78	249,48	204,43
O <sub>2</sub>	%	8,28	8,82	7,70	8,68

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku zastosowania Paliwa 1 emisja tlenku węgla, jak i tlenków azotu przekracza dopuszczalny próg zarówno dla normy PN-EN 303-5:2012, jak i dyrektywy unijnej. W przypadku tlenku węgla nadwyżka nie jest duża bo wynosi tylko około 17 mg/m<sup>3</sup> dla 10% O<sub>2</sub>. Przy założeniu błędu pomiarowego zgodnie z normą na poziomie ± 10% wysoce prawdopodobne jest, że kocioł również i dla tego paliwa spełniłby wymagania odnośnie do emisji. Warto również przypomnieć, że Paliwo 1 traktowane jest jako węgiel brunatny w sortymencie groszek, co ma bezpośredni wpływ na otrzymaną tak wysoką emisję tlenku węgla. W przypadku paliw 2, 3 i 4 kocioł emitował przy ich spalaniu przez cały okres badań ilości substancji szkodliwych mieszczące się w progach emisyjnych dyktowane przez normatywy. W tym miejscu warto również zauważyć, że widać tendencję spadkową emitowanych substancji z kotła wraz ze wzrostem wartości opałowej paliwa. Powodów tego może być wiele, natomiast dwa podstawowe z nich to:

- paliwo droższe ma większą wartość opałową co wiąże się z jego wyższą ceną i jakością,
- wyższa wartość opałowa powoduje mniejsze zużycie paliwa niezbędne do osiągnięcia wymaganej mocy cieplnej urządzenia, a to bezpośrednio wpływa na mniejszą emisję substancji szkodliwych.

Średnia zawartość tlenu w poszczególnych cyklach pomiarowych wahała się w przedziale od 7,70% do 8,82%, co daje współczynnik nadmiaru powietrza λ w przedziale od 1,5 do 1,7. W niektórych przypadkach zaobserwowano jednak duży wzrost tlenu w spalinach. Prawdopodobnie wynika z faktu, że w momencie podawania paliwa przez podajnik następuje obluźowanie i przesunięcie paliwa w wiencu palnika, efektem tego ruchu jest obsypanie popiołu do popielnika ale również może mieć to wpływ na chwilowe odsłonięcie kanałów powietrznych, a to w konsekwencji skutkuje chwilowym wzrostem zawartości tlenu w spalinach.



#### 4. Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań było pokazanie zależności zastosowanego paliwa węglowego sortymentu groszek na emisję substancji szkodliwych. Badania przeprowadzono na kotle wodnym niskotemperaturowym, z palnikiem o podawaniu opału w sposób automatyczny. Z przeprowadzonych badań widzimy, że przy stosowaniu kotła niskoemisyjnego spełniającego najwyższe standardy emisyjne bardzo ważnym elementem utrzymania niskiego poziomu emitowanych substancji jest odpowiedni dobór paliwa. W doborze paliwa powinniśmy kierować się jego parametrami technicznymi takimi jak granulacja, wartość opałowa oraz wilgotność. Wpływ na skład substancjalny produkowanych spaliny ma nie tylko kryterium konstrukcyjne ale i kryterium zastosowanego opału. Ciągła dążność do poprawy jakości powietrza powoduje konieczność pochylenia się nad problemem emitowanych substancji szkodliwych z sektora bytowego w celu propagowania technologii niskoemisyjnych. Zagadnienie to może być pomocne dla producentów i operatorów kotłów małej mocy chcących utrzymać na niskim poziomie ilość emitowanych substancji szkodliwych. Zagadnienie optymalizacji konstrukcji kotłów

niskotemperaturowych z punktu widzenia emitowanych spalin wymaga dalszych badań i opracowania algorytmu postępowania. Kwestie te są niezwykle ważne ze względu na liczbę niskotemperaturowych kotłów produkowanych w kraju.

#### L I T E R A T U R A

- [1] Ciupek Bartosz, Rafał Urbaniak, Jarosław Bartzewicz. 2017. „Przegląd węgla sortymentu groszek z wybranych marketów budowlanych”. *Magazyn Instalatora*.
- [2] Bartzewicz Jarosław, Rafał Urbaniak. 2010. „Analiza wpływu konfiguracji ustawień sterowania na pracę kotła małej mocy”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 41(8): 241-246.
- [3] Bartzewicz Jarosław. 2008. „Analiza konstrukcji kotłów niskotemperaturowych, wodnych opalanych paliwem stałym”. *Ciepłownictwo, Ogrzewanie, Wentylacja*. Nr 6, s. 7-29.
- [5] PN-EN 303-5:2012 „Kotły grzewcze – Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.”
- [6] PN-EN 12809:2002 „Kotły grzewcze na paliwa stałe. Nominalna moc cieplna do 50 kW. Wymagania i badania.”
- [7] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 1 sierpnia 2017r. w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe. Poz. 1690.
- [8] Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189, w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe.



## FORUM TERMOMODERNIZACJA 2018

**17 kwietnia 2018 r.**, w salach Ośrodka Sportu i Rekreacji w Warszawie przy ul. Polnej 7A odbędzie się **FORUM TERMOMODERNIZACJA 2018** organizowane przez Zrzeszenie Audytorów Energetycznych. Jest to już 18. FORUM organizowane przez ZAE i jak zawsze dokonany zostanie przegląd aktualnie najważniejszych problemów efektywności energetycznej w budynkach.

Głównym tematem tegorocznego FORUM będzie **Termomodernizacja w walce ze smogiem**. Podczas najbliższej edycji konferencji wśród poruszanych tematów znajdzie się bardzo aktualne zagadnienie jakim jest walka ze smogiem. Postaramy się znaleźć wspólny mianownik między smogiem a termomodernizacją budynków. Forum Termomodernizacja to nie tylko wymiana doświadczeń, ale także możliwość poznania sposobów na zmniejszenie emisji smogu, nowych kierunków w energetyce, innowacyjnych technologii wykorzystywanych w przemyśle oraz rozwiązań służących poprawieniu efektywności energetycznej.


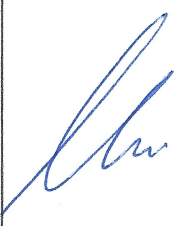

*Zachęcamy Państwa do zgłaszania uczestnictwa w wydarzeniu.*

Szczegółowe informacje o programie FORUM i zgłaszaniu uczestnictwa są na:  
[www.zae.org.pl](http://www.zae.org.pl)

Poznań, 16.06.2020

### Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej

**Bartosz Ciupek**, Rafał Urbaniak, Jarosław Bartoszewicz, Emisja tlenu węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja - 2018, tom 49, nr 3, s. 90-94, DOI: 10.15199/9.2018.3.2

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Opracowanie metodologii badawczej, udział w badaniach kotłów, analiza otrzymanych wyników, wykonanie rysunków, wykresów i tabel. Wnioski końcowe, redakcja artykułu.	40%	
2.	Rafał Urbaniak	Przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych, analiza uzyskanych wyników, opracowanie oraz przeprowadzenie badań w warunkach laboratoryjnych. Analiza otrzymanych wyników badań w warunkach laboratoryjnych, formatowanie tekstu publikacji.	40%	
3.	Jarosław Bartoszewicz	Wsparcie merytoryczne, synteza rezultatów, redakcja tekstu publikacji.	20%	

# Możliwość obniżenia emisji substancji szkodliwych z kotła małej mocy przez współspalanie węgla kamiennego z biomasą niedrzewną

*Possibilities of Reducing Harmful Substance From the Heating Boiler by Co-Firing Black Coal with Non-Woody Biomass*

DOI: 10.15199/9.2018.7.2

BARTOSZ CIUPEK

**Słowa kluczowe:** kotły grzewcze, współspalania, emisja, substancje szkodliwe, biomasa niedrzewna

## Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę współspalania biomasy niedrzewnej z węglem kamiennym. Autor przeprowadził serię badań w celu określenia możliwości zastosowania standardowych automatycznych kotłów na paliwo stałe z palnikiem retortowym do spalania paliwa alternatywnego w postaci biomasy niedrzewnej. Biomasą użytą do badań były nasiona zbóż z przeważającym udziałem owsa. Omówiono także znaczenie spalania biomasy w przemyśle energetycznym i możliwościach zastosowania jej w ciepłownictwie indywidualnym. Ponadto opisano stosowaną metodykę badań. Otrzymane wyniki przeanalizowano w aspekcie aktualnego poziomu wiedzy. Podstawową konkluzją wynikającą z badań jest potrzeba ich dalszego prowadzenia.

**Keywords:** heating boilers, co-firing, emission, harmful materials, non woody biomass

## Abstract

The article presents an analysis of the impact of co-combustion of non-woody biomass with hard coal. The author conducted a series of tests to determine the applicability of standard automatic solid fuel boilers with a retort burner for the combustion of alternative fuel in the form of non-wood biomass. The biomass used for the research was cereal seeds with the main share of oats. In addition to the results obtained, the importance of biomass share in the energy industry and the possibilities of its application in individual heating systems was discussed. Additionally, the research methodology used in the experiment is presented. The obtained results were analyzed with the current level of knowledge. The basic conclusion coming from the research is to further develop and explore the topic of the possibility of improving the state of the environment by co-firing of carbonaceous fuels with biomass.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
All right reserved

## 1. Wstęp

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się wzrost zanieczyszczenia środowiska spowodowany niewłaściwym użytkowaniem urządzeń grzewczych małej mocy. Ponadto powoduje to znaczny wzrost kosztów ogrzewania budynków, przy czym główną tego przyczyną jest wzrost cen paliw.

Ogrzewania indywidualne mają znaczny udział w sektorze wytwarzania energii, który wynosi ok. 30%. Obejmuje to małe kotłownie komunalne i przemysłowe, które ze względu na zły stan techniczny, mają jeszcze większy udział w wytwarzaniu związków toksycznych. W 1995 r. uruchomiono w Polsce pierwszy program „Czyste spalanie niskoemisyjne”, ograniczający emisję z komunalnych, przemysłowych i indywidualnych kotłowni. Prace nad programem zaowocowały kryteriami emisji dla „ekologicz-

nego znaku bezpieczeństwa” w przypadku kotłów grzewczych opalanych paliwami stałymi. Niestety, certyfikat ten nie był obowiązkowy i znaczna większość producentów nie przekazywała swoich kotłów do badań certyfikacyjnych. Od października 2017 r. aktualnym aktem prawnym dotyczącym produkcji i sprzedaży kotłów na paliwa stałe jest rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów. Przepisy zawarte w niniejszym rozporządzeniu odnoszą się do obowiązku produkcji i sprzedaży kotłów wytwarzanych w klasie piątej zgodnie z PN-EN 303-5 [5]. Ponadto w UE obowiązuje już rozporządzenie o ekoprojekcie kotłów na paliwa stałe, którego obwarowania są często wytycznymi do dofinansowania zakupu nowego urządzenia w wielu polskich gminach [6].

Głównym powodem wprowadzenia w Polsce ograniczeń w odniesieniu do kotłów na paliwa stałe jest nadmierna emisja substancji szkodliwych głównie podczas sezonu grzewczego [1]. W Polsce średni okres ogrzewania trwać może nawet do 6 miesięcy w roku. W okresie tym obserwuje się duży wzrost zapylenia powietrza cząstkami PM10 i PM 2.5, a także miejscowe występowanie smogu

mgr inż. Bartosz Ciupek; bartosz.r.ciupek@doctorate.put.poznan.pl  
Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu,  
Politechnika Poznańska, Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska

fotocemicznego. Na powstawanie toksycznych związków wpływa nie tylko producent urządzeń grzewczych, ale także zwykły użytkownik. Właściwy dobór systemu grzewczego wpływa bezpośrednio na emisję szkodliwych substancji. Konieczność ograniczenia ilości powstających substancji szkodliwych emitowanych z urządzeń grzewczych wymaga zmian ich konstrukcji. Proces ten jest jednak długotrwały i kosztowny a ponadto daje tylko doraźne efekty, gdyż dotyczy osób zmieniających urządzenie grzewcze a nie ogółu użytkowników. Inną możliwością redukcji substancji szkodliwych z urządzeń kotłowych jest współspalania paliw węglowych z biomasą. [7]

Aby określić możliwości współspalania biomasy nie-drzewnej z węglem kamiennym w artykule omówiono możliwości wykorzystania tego procesu w kotłach grzewczych. Do badań wykorzystano owies jako paliwo towarzyszące, ponieważ jest on trzecim co do wielkości ziarnem produkowanym w Polsce. W gospodarce stosowany jest głównie do żywienia zwierząt. Ponadto należy zwrócić uwagę na możliwość wykorzystania owsa jako paliwa alternatywnego.

## 2. Cel badań

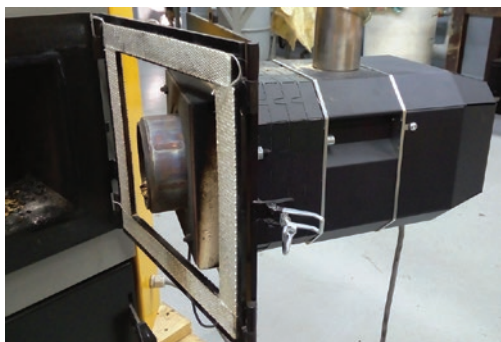
Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie czy po zastosowaniu w kotle grzewczym paliwa alternatywnego w postaci ziarna owsa znacząco spadnie emisja substancji szkodliwych z urządzenia.

## 3. Opis obiektu badań

Zwykle stosowane w gospodarstwach domowych instalacje grzewcze składają się z zestawu urządzeń i elementów, których zadaniem jest generowanie i dystrybucja ciepła w budynku. Podstawowymi elementami są: źródło i system dystrybucji ciepła oraz wewnętrzne instalacje grzewcze. Źródłem ciepła w omawianym przypadku jest kocioł grzewczy na paliwa stałe. Jeśli chodzi o kotły opalane biomasą, ich konstrukcja powinna zapewnić właściwy proces spalania. Podstawową różnicą między kotłami węglowymi a kotłami na biomasę stanowi palnik. Kotły opalane peletami drzewnymi mają odpowiedni palnik przystosowany do spalania tych paliw. Palnik peletowego zaprezentowano na rys. 1.

W przypadku palników węglowych w konstrukcjach pierwszej generacji (czyli najstarszego typu) możliwe jest spalanie i współspalanie węgla z biomasą. Przykład palnika retortowego pierwszej generacji przedstawiono na rys. 2.

Podczas eksploatacji urządzeń grzewczych małej mocy należy przestrzegać zasad w odniesieniu do rodzaju paliwa, które można spalać w danym palniku lub palenisku.



Rys. 1. Palnik peletowy  
Fig. 1. Pellet burner



Rys. 2. Palnik retortowy pierwszej generacji  
Fig. 2. First generation retort burner

Źle dobrane paliwo lub niedostosowane parametry pracy palnika do spalanego paliwa mogą skutkować niewłaściwym procesem spalania lub uszkodzeniem palnika. Na rysunku 3 przedstawiono spiek żuźla węgla kamiennego z ziarnami owsa przy niedokładnie wyregulowanym procesie spalania.

Kotły z automatycznym podawaniem paliw mają znacznie bardziej skomplikowaną konstrukcję. Przykładowy kocioł na paliwo stałe z automatycznym podawaniem paliwa przedstawiono na rys. 4. Urządzenie to było obiektem badań.

Wśród stosowanych palników do kotłów grzewczych na paliwa stałe można wyróżnić dwa standardowe typy: pierwszy z dolnym paleniskiem retortowym i drugi z poziomym podawaniem paliwa w formie rynny lub tłoka. Powszechnie stosowanymi materiałami spalnymi w omawianych palnikach są: pelety drzewne, pestki owoców, nasiona i węgiel. Możliwość spalania wiórow drzewnych jest ograniczona ze względu na ich wysoką wilgotność.



Rys. 3. Spiek żuźla w trakcie spalania węgla z owsem  
Fig. 3. Coke sintering during the combustion of coal with oats in a mixture



Rys. 4. Obiekt badań – kocioł grzewczy na paliwo stałe  
Fig. 4. Test facility in the form of a solid fuel heating boiler

W kotłach z automatycznym doprowadzaniem paliwa konieczne jest również zabezpieczenie przed cofaniem się płomienia. W przypadku kotłów z palnikiem retortowym zabezpieczenie stanowią czujniki umieszczone w zbiorniku; gdy temperatura paliwa wzrośnie powyżej ustawionej wartości, następuje przyspieszenie podawania paliwa, co uniemożliwia cofnięcie się płomienia do zasobnika.

#### 4. Metodyka badań

W przeprowadzeniu eksperymentu posłużono się metodyką badań kotłów grzewczych na paliwa stałe opisaną w normie PN-EN 303-5: 2012. W kotle o znamionowej mocy 18 kW zamontowano palnik retortowy, który wykorzystano do spalania mieszaniny owsa z węglem kamiennym. Założeniem testów była analiza pracy kotła przy 100% i 50% mocy cieplnej. Kocioł pracował w systemie otwartym. Paliwo w postaci mieszaniny 50/50 węgla kamiennego i owsa umieszczono w zasobniku przykotleowym. Pracę urządzenia regulowano za pomocą sterownika mikroprocesorowego, ustawiając czas pracy i czas przerwy podawania oraz prędkości obrotowej wirnika wentylatora podmuchowego. Ciepło wytworzone w procesie spalania było przekazywane przez wymienniki ciepła do zbiornika buforowego. Pierwszą fazą każdego z dwóch etapów badań było ustawienie odpowiedniej mocy kotła. Moc była określana na podstawie pomiaru masy strumienia wody opuszczającej wymiennik ciepła oraz jej temperatury na wlocie i wylocie z wymiennika. Obliczenia wykonano stosując wzór:

$$P = \frac{Q}{t} \cdot 4,18 \cdot (T_p - T_z)$$

gdzie:

- $Q$  – masa wody, kg,
- $t$  – czas pomiaru, s,
- $T_p$  – temperatura powrotu z wymiennika, °C,
- $T_z$  – temperatura zasilania wymiennika, °C.

Po ustaleniu mocy i doprowadzeniu układu do stanu ustalonego, skład spalin analizowano za pomocą analiza-

tora z możliwością pomiaru ciągłego. Stężenie tlenku węgla (CO) oraz temperaturę gazów spalinowych mierzono, gdy moc cieplna urządzenia była ustalona. Pomiar temperatury wykonano za pomocą czujników platynowych PT100. Pomiar i rejestrację przeprowadzono za pomocą multimetru KEITHLEY 2000 podłączonego do multipleksera. Sygnały były rejestrowane za pomocą programu LabView; czujniki temperatury umieszczono na wejściu i wyjściu z kotła oraz przy wejściu i wyjściu wymiennika ciepła. Każdy pomiar trwał około 120 minut. Po dwóch godzinach zwiększono moc cieplną kotła z 9 kW na 18 kW zmieniając ustawienia pracy palnika. Następnie po osiągnięciu stanu ustalonego mierzono temperaturę i parametry spalin opuszczających kocioł. Pomiar gazów spalinowych wykonano w ciągu 300 s, a temperaturę mierzono automatycznie co 3 s.

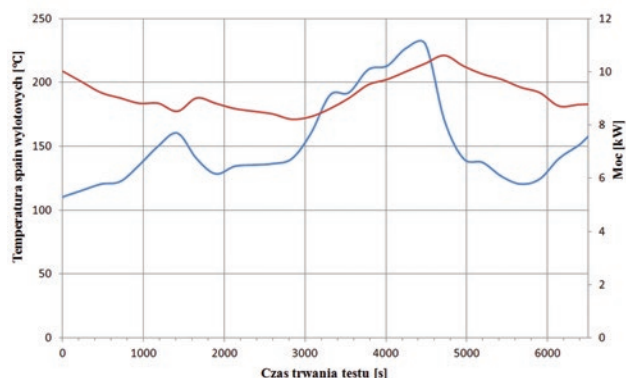
#### 5. Analiza wyników

Paliwem używanym do badań była mieszanina węgla i ziaren owsa. Zastosowany skład mieszaniny powinien najlepiej odzwierciedlać możliwość współspalania biomasy nieдрzewnej z węglem w kotłach małej mocy. Pierwsze pomiary wykonano w warunkach 50% mocy cieplnej kotła czyli około 9 kW. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 5. Niebieską linią zaznaczono przebieg temperatury spalin, a czerwoną moc cieplną kotła.

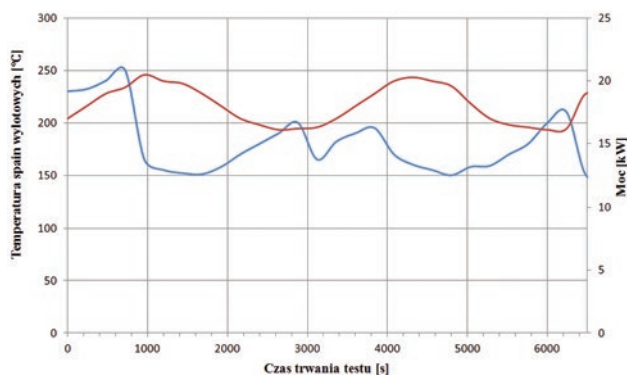
Na rysunku 5 widać, że temperatura spalin podczas procesu testu, wahała się od 110°C do 240°C. W trakcie procesu widzimy jej narastanie, co wiąże się z szybszym wypaleniem ziaren owsa, które mają mniejszą kaloryczność i następnie spalanie już samego węgla i dopalaniem powstałego koksu. Moc cieplna w czasie całego pomiaru wahała się między 8 kW a 10,5 kW przyjmując największy poziom zaraz po nagłym skoku temperatury. Jednocześnie spadek temperatury po jej skoku w 3000 sekundzie wiąże się z odebraniem ciepła przez części konwekcyjne kotła i jednoczesnym wzrostem mocy cieplnej urządzenia.

Drugie pomiary wykonano w warunkach 100% mocy cieplnej kotła, czyli około 18 kW. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 6. Podobnie jak wcześniej niebieską linią zaznaczono przebieg temperatury spalin a czerwoną moc cieplną kotła.

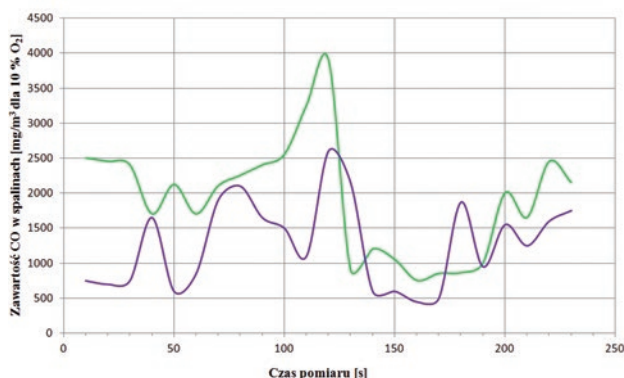
Na rysunku 6 widać, że temperatura spalin podczas testu wahała się od 150°C do 260°C. W czasie badania widzimy jej stosunkowo ustabilizowany przebieg. Wynika to z szybszego procesu spalania paliwa w palniku wynikającego z osiągnięcia żądanej maksymalnej mocy cieplnej. Szybkość prowadzonego procesu nie wpływa znacząco na



Rys. 5. Zmiany temperatury spalin i mocy cieplnej kotła w czasie pracy kotła z 50% mocą cieplną  
Fig. 5. Heat flue gas temperature and heat output of the boiler during operation with 50% thermal power



Rys. 6. Zmiany temperatury spalin i mocy cieplnej kotła w czasie pracy kotła z 100% mocą cieplną  
Fig. 6. Heat flue gas temperature and heat output of the boiler during operation with 100% thermal power



Rys. 7. Przebieg emisji CO dla 50% i 100% mocy cieplnej kotła  
Fig. 7. The course of CO emission for 50% and 100% of the thermal power of the boiler

fizykochemię spalania i podobnie jak w pierwszym przypadku możemy zaobserwować wysoką temperaturę spalin pochodzącą od szybko odgazowującego i spalającego się paliwa. Moc cieplna w trakcie całego pomiaru wahała się między 17 kW a 20 kW przyjmując największy poziom dwa razy: w 1000 sekundzie i 4300 sekundzie, co związane jest z fazą wypalania koksiku powstałego z palącego się węgla.

Stężenie tlenu węgla w spalinach jest wyraźnie wyższe w przypadku kotła pracującego z 50% mocą cieplną. Emisja tlenu węgla podczas pracy przy mocy znamionowej jest znacznie niższa. Fakt ten wynika z dłuższego przestoju w pracy palnika, niedoborze powietrza podawanego do procesu spalania potrzebnego do utrzymania niskiej mocy cieplnej urządzenia oraz możliwości niedopalenia gazów powstałych z odgazowania paliwa. Zmianę stężeń tlenu węgla przedstawiono na rys. 7. Linia zieloną zaznaczono przebieg dla 50% mocy, linią fioletową dla mocy znamionowej.

Parametry pracy kotła w warunkach danej mocy zestawiono w tabeli.

## 6. Wnioski

Celem eksperymentalnej części pracy była analiza możliwości współspalania węgla kamiennego i biomasy nie-drzewnej w kotłach grzewczych na paliwa stałe. Testy przeprowadzono w warunkach nominalnej mocy kotła i przy 50% mocy cieplnej. Kocioł, w którym przeprowa-

TABELA. Średnie wybrane parametry pracy kotła podczas badań

TABLE. Average selected parameters of boiler operation during tests

Parametry pracy kotła		
Wielkość	50% mocy cieplnej	100% mocy cieplnej
Moc, kW	8,9	18,6
$t_s$ spalin, °C	175,5	210,5
O <sub>2</sub> , %	6,4	10,7
CO <sub>2</sub> , %	14,5	10,2
CO, mg/m <sup>3</sup>	1920,7	1279,3

dzono testy, jest standardowym kotłem wykorzystywanym w gospodarstwach domowych w Polsce.

Przedmiotem analizy procesów spalania były: temperatura spalin, moc cieplna i emisja tlenu węgla. Wszystkie wymienione parametry są znacznie lepsze, gdy kocioł pracuje z mocą nominalną. Wyniki badań emisji tlenu węgla przemawiają na korzyść stosowania biomasy w procesie współspalania. W przypadku spalania biomasy stanowiącej 50% spalanej paliwa stwierdzono:

- możliwość osiągnięcia żądanej mocy cieplnej,
- zmniejszenie stężenia tlenu węgla w przypadku pracy z mocą znamionową,
- mniejszy poziom stężenia tlenu węgla w porównaniu ze spalaniem tylko węgla kamiennego (wyniki ok. 2000 mg/m<sup>3</sup>-3500 mg/m<sup>3</sup> w palniku starej konstrukcji),
- prosty sposób zmniejszenia emisji substancji szkodliwych bez ingerencji w konstrukcję kotła lub palnika.

Z przeprowadzonych badań wynika, że współspalanie węgla kamiennego z biomasa nie-drzewną umożliwia obniżenie poziomu emitowanych szkodliwych substancji bez konieczności ingerencji w konstrukcję urządzenia.

Z badań, obserwacji i analizy literatury [2], [3] i [4] wynika, że temat jest rozwojowy i należałoby go jeszcze pogłębić o pełną analizę spalin (NO<sub>x</sub>, OGC oraz PM) w celu pełnego określenia możliwości wykorzystania biomasy nie-drzewnej jako współpaliwa w procesie spalania w urządzeniach grzewczych.

## LITERATURA

- [1] Ciupek B., R. Urbaniak, J. Bartoszewicz. 2018. „Emisja tlenu węgla i tlenu azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (3), s. 90-94.
- [2] Guiqiu S. 2017. „Experimental Study on the Transformation of Biomass and Coal Under Different Atmospheric Conditions”. *Chemical Engineering Transactions*, (62): 1273-1274.
- [3] Gołec T., R. Lewtak, B. Świątowski, B. Głot. 2010. „Współspalanie biomasy z węglem”. *Czysta Energia* (9): 26-29.
- [4] Kubica K., M. Ściążko, J. Raińczak. 2003. „Współspalanie biomasy z węglem”. *Polityka Energetyczna*, T. (6): 297-307.
- [5] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze - Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW - Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- [6] Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189, w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwa stałe.
- [7] Urbańczyk P., M. Zajemska, G. Golański, D. Musiał, A. Poskart. 2017. „Modelowanie współspalania węgla i biomasy w kotle energetycznym”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 48 (5): 183-186.
- [8] Wilk R., T. Sarnowski. 2009. „Współspalanie węgla z biomasa w ujęciu technologii spalania”. *Archiwum Spalania*, vol. 9, (3-4): 197-211.

# Wpływ zawirowania strugi spalin na obniżenie emisji pyłów oraz podniesienie sprawności cieplnej kotła peletowego

*The Influence of Turbulization of Exhaust Gases on Lowering Dust Emissions and Improvement of Thermal Efficiency of Pellet Boiler*

DOI: 10.15199/9.2018.8.6

BARTOSZ CIUPEK

**Słowa kluczowe:** kotły grzewcze, turbulatory spalin, emisja, substancje szkodliwe, pył

## Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wpływu zawirowania strugi spalin odlotowych kotła grzewczego na obniżenie emisji pyłów oraz podniesienie sprawności cieplnej urządzenia. Badany obiekt spełniał warunki cieplno-emisyjne w odniesieniu do kotłów wykonanych zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) 2015/1189 dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwa stałe oraz normy PN-EN 303-5:2012. Kocioł był wyposażony przez producenta w palnik na paliwo stałe typu pelet drzewny. W trakcie badań praca kotła była sterowana przez mikroprocesorowy regulator temperatury. Celem badań było sprawdzenie czy zastosowanie turbulatorów spalin w częściach konwekcyjnych kotła obniży stężenie cząstek stałych oraz zwiększy sprawność cieplną urządzenia. W artykule opisano metodykę badań oraz analizę otrzymanych wyników. Skutkiem przeprowadzonych badań jest zestawienie średnich wartości emisji pyłów oraz otrzymanej mocy cieplnej w zależności od liczby zastosowanych turbulatorów. Wyniki badań stanowią przesłankę do dalszych prac badawczych w aspekcie wpływu zawirowania strugi spalin na obniżenie stężenia pyłów i podniesienia sprawności cieplnej kotłów na paliwa stałe.

**Keywords:** heating boilers, turbulators, emission, harmful materials, dust

## Abstract

The article presents the analysis of the influence of turbulence in the stream of waste gas from a boiler to reduce dust emissions and increase the thermal efficiency of the device. The research facility met the heat and emission conditions for boilers made in accordance with the EU Commission Regulation 2015/1189 regarding the ecodesign for solid fuel boilers and EN 303-5:2012. The boiler was supplied with a wood pellet burner dedicated from the manufacturer. During the tests, boiler operation was controlled by a microprocessor temperature controller. The aim of the research was to check if using turbulators in the boiler's convection parts a reduction of particulate matter emission would be achieved and the thermal efficiency of the device would increase. The article describes the research methodology used and the analysis of the results obtained. The effect of the conducted tests is a comparison of average dust emission values and thermal power received depending on the number of turbulators used. The test results are a prerequisite for further research work in terms of the impact of turbulence in the exhaust stream on reducing dust emissions and increasing the thermal efficiency of solid fuel boilers.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
All right reserved

## 1. Wstęp

Głównym zadaniem kotłów grzewczych jest konwersja energii chemicznej paliwa w ciepło gromadzone w czynniku roboczym i wykorzystywane do ogrzewania. Jednym z elementów składowych procesu spalania jest emisja spalin. Spaliny, jako produkt reakcji spalania, składają się z wielu związków chemicznych, w tym substancji szkodliwych. Wiele z powstających produktów spalania ma negatywny wpływ na organizm człowieka i otaczające go środowisko. Jedną z głównych substancji szkodliwych powstającą w procesie spalania jest pył (PM). Pyły zawieszone w powietrzu są niebezpieczne dla zdrowia ze wzglę-

du na ich reaktywność z innymi toksynami. Oddychanie zapyłonym powietrzem wpływa negatywnie na górne drogi oddechowe oraz układ krążenia. U osób narażonych na częsty kontakt z zapyłonym powietrzem może dojść do poważnych chorób dróg oddechowych, m.in. nowotworów. Duże zapylenie powietrza w okresie grzewczym jest poważnym problemem ogrzewnictwa w XXI wieku. Główną przyczyną zanieczyszczenia powietrza jest niska emisja spowodowana niewłaściwie prowadzonym procesem spalania w urządzeniach grzewczych opalanych paliwami stałymi [1]. Dodatkowym problemem wpływającym bezpośrednio na zanieczyszczenie powietrza jest spalanie odpadów oraz nisko jakościowych paliw. Spalanie odpadów oraz stosowanie niskiej jakości paliw jest cechą uboższego społeczeństwa. Zwiększająca się świadomość społeczna dotycząca konieczności poprawy jakości powietrza powoduje, że coraz więcej użytkowników wybiera urządzenia spełniające wymagania najwyższej klasy emisyj-

mgr inż. **Bartosz Ciupek**; bartosz.r.ciupek@doctorate.put.poznan.pl  
Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu,  
Politechnika Poznańska, Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska

ności. Innym sposobem walki z niską emisją jest zamiana starych urządzeń opalanych węglem na nowoczesne kotły peletowe. Konstrukcje te charakteryzują się wysoką sprawnością cieplną oraz wielokrotnie mniejszą emisją substancji szkodliwych w stosunku do starych urządzeń opalanych węglem.

## 2. Cel badań

Celem badań było sprawdzenie czy po zastosowaniu w kotle grzewczym turbulatorów spalin osiągnięte się znaczący spadek zawartości pyłów w spalinach i poprawi się sprawność cieplną urządzenia.

## 3. Metodyka badań

Dokładną metodykę oraz sposób wykonywania badań kotłów grzewczych na paliwa stałe opisano w normie PN-EN 303-5:2012. W badaniach stosowano metody opisane w normie [3].

Do badań zastosowano paliwo typu pelet drzewny. Otrzymane wyniki badań zestawiono z obecnie obowiązującymi przepisami dotyczącymi emisji pyłów z kotłów grzewczych. Zgodnie z normą [3] emisja pyłów z kotłów z automatycznym podawaniem paliwa wykonanych w klasie piątej nie ma być większa niż  $40 \text{ mg/m}^3$  przy 10% tlenu w spalinach. W badaniach przyjęto, że średnia arytmetyczna emisji pyłów z całego cyklu badawczego nie powinna przekraczać tej wartości. W przypadku kotła zaliczanego do klasy piątej, sprawność cieplna nie może być niższa niż 87%. Wymaganie to dotyczy jednak kotłów o mocy cieplnej do 100 kW.

Badania były podzielone na trzy cykle badawcze. W każdym z cykli badawczych dokonano zmiany elementów konstrukcyjnych kotła, następnie rozpalono urządzenie, osiągnięto znamionową moc cieplną oraz wyregulowano palnik w celu uzyskania stałych parametrów cieplnych. Następnie w stabilnych warunkach wykonano badania cieplno-emisyjne kotła.

Badania prowadzono w następujący sposób:

- Pierwszy cykl badawczy polegał na przeprowadzeniu badań cieplno-emisyjnych jednostki dostarczanej przez producenta po osiągnięciu mocy znamionowej bez ingerencji w jego części konwekcyjne. Celem tej części badawczej było określenie parametrów wyjściowych pracy kotła.

- Drugi cykl badawczy polegał na umieszczeniu w rurowej części konwekcyjnej trzeciego ciągu spalin, turbulatorów w celu zaburzenia przepływu spalin. W drugim cyklu umieszczono turbulatory w co drugiej rurze, co dało osiem turbulatorów. Podobnie jak w pierwszym cyklu badawczym, po ustabilizowaniu pracy układu wykonano badania cieplno-emisyjne kotła.

- Trzeci cykl badawczy polegał na umieszczeniu we wszystkich rurach trzeciego ciągu konwekcyjnego turbulatorów co dało szesnaście turbulatorów. Tak jak w pierwszym i drugim cyklu badawczym, po ustabilizowaniu pracy układu przeprowadzono badania cieplno-emisyjne kotła.

W każdym cyklu badawczym były utrzymywane stałe i jednakowe parametry pracy kotła, przy czym w trakcie pomiarów nie ingerowano w ustawienia pracy kotła. Temperatura wody na zasilaniu utrzymywana była średnio na poziomie od  $65^\circ\text{C}$  do  $80^\circ\text{C}$ , a na powrocie średnio od  $50^\circ\text{C}$  do  $65^\circ\text{C}$ ; różnica temperatury wynosiła ok.  $15^\circ\text{C}$ . W trakcie badań panowały jednakowe warunki środowiskowe.

Praca urządzenia grzewczego była sterowana za pomocą mikroprocesorowego układu regulacyjnego. Takie rozwiązanie umożliwiło płynną zmianę ustawienia podawania paliwa oraz powietrza do palnika, tak aby uzyskać jednakowe parametry pracy w każdym badaniu. Obiektem badań był niskotemperaturowy kocioł centralnego ogrzewania o mocy znamionowej 25 kW produkcji krajowej. Kocioł oraz palnik peletowy pokazano na rys. 1 i 2. Badany kocioł miał certyfikat wydany przez niezależną jednostkę notyfikowaną potwierdzający spełnianie przez urządzenie wymagań normy PN-EN 303-5 dotyczących kotłów wykonanych w klasie piątej oraz zapisów Rozporządzenia



Rys. 1. Kocioł peletowy – badany obiekt  
Fig. 1. Pellet boiler – tested object



Rys. 2. Pracujący palnik peletowy – badany obiekt  
Fig. 2. Pellet burner in operation – tested object



Komisji (UE) 2015/1189 dotyczących ekoprojektu kotłów na paliwa stałe [4]. Do pomiaru wybranych parametrów emisyjnych spalin wykorzystano pyłomierz grawimetryczny. Lanca do poboru spalin była zamontowana na stałe w kominie pomiarowym, a wybrane parametry spalin niezwiązane z pomiarem zapylenia mierzono i rejestrowano za pomocą odpowiedniego programu. Wartość emisji w cyklu badawczym określono jako średnią arytmetyczną z poszczególnych pomiarów w całym cyklu. Każdy cykl badawczy trwał około 3h. Zebrane parametry zostały przeliczone na wartości w  $\text{mg}/\text{m}^3$  przy 10%  $\text{O}_2$ , co jest zgodne z normą PN-EN 303-5:2012.

Laboratorium badawcze było zaopatrzone w układ wymienników ciepła, służących do odebrania ciepła wytworzonego w czasie badań. Odpływ spalin połączono za pomocą czopucha z kominem pomiarowym. W sondach umieszczonych w kominie zamontowano termopary do pomiaru temperatury spalin. Końcową temperaturę spalin określono jako średnią arytmetyczną z pięciu termopar pomiarowych. Moc kotła była mierzona metodą bezpośrednią po stronie wody grzejnej. Moc cieplną kotła wyznaczono za pomocą układu złożonego z czterech wymienników ciepła połączonych szeregowo, znamionowa moc cieplna każdego wymiennika wynosiła 50 kW. Dodatkowo zastosowano przepływomierz elektromagnetyczny oraz termopary do pomiaru temperatury wody na zasilaniu i powrocie z kotła. Dodatkowo do oszacowania mocy cieplnej oddanej przez wodę grzejną mierzono strumień masy wody odpływającej z wymienników, za pomocą wagi. W trakcie każdego z cykli badawczych, po uzyskaniu wymaganych parametrów cieplnych stabilizowano pracę urządzenia i wykonywano pomiary oraz analizę zapylenia spalin. Do pomiarów stężenia pyłów w spalinach wykorzystano aparatę referencyjną w postaci pyłomierza grawimetrycznego. Do pomiaru stężenia innych substancji szkodliwych w spalinach wykorzystano analizator spalin z możliwością pomiaru ciągłego. Do badań wykorzystano paliwo typu pelet drzewny o deklarowanej wartości opałowej ok. 4,1 kWh/kg, wilgotności całkowitej poniżej 10%. Paliwo zostało przed badaniami ustabilizowane w jednakowych warunkach laboratoryjnych. Producent peletu poinformował o znacząco większym udziale drewna iglastego w stosunku do drewna liściastego.

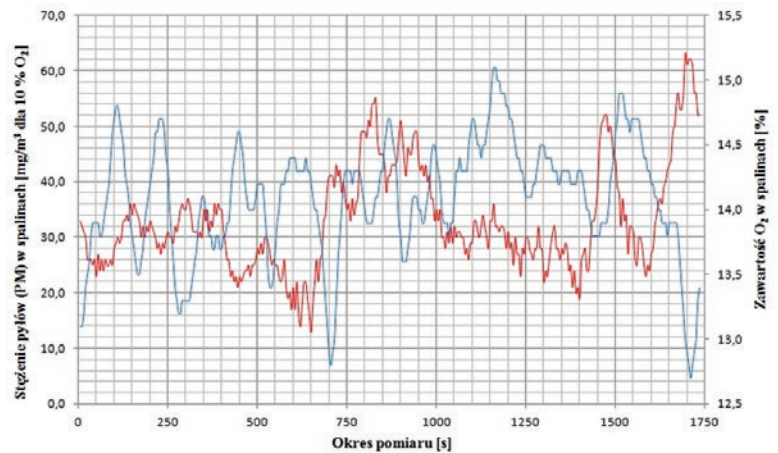
#### 4. Analiza wyników badań

W celu ułatwienia interpretacji otrzymanych wyników badań przedstawionych na wykresach, zastosowano jednolity system oznaczeń mierzonych i rejestrowanych parametrów. System ten przedstawiono na rys. 3.

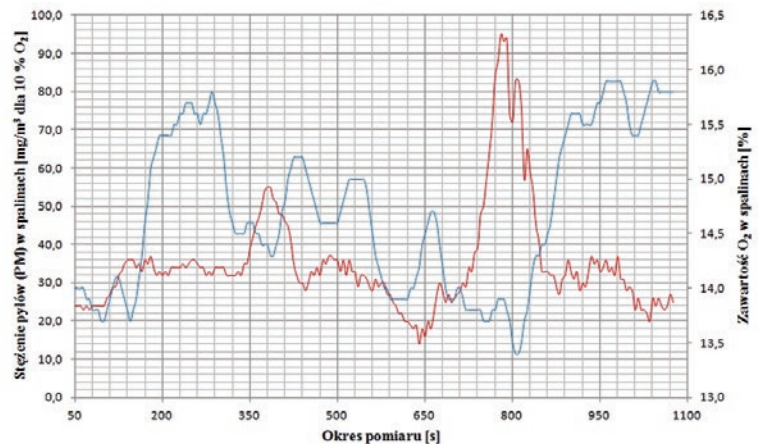
Przed rozpoczęciem badań ustabilizowano w jednakowych warunkach laboratoryjnych parametry paliwa w postaci peletu drzewnego. Miało to zapewnić jednakowe parametry fizyko-chemiczne paliwa, co pozwoliło na zmniejszenie wpływu losowości tych parametrów w danej partii opału. Takie postępowanie miało znaczenie, gdyż w trakcie badań wykorzystano dużą ilość pa-

- zawartość  $\text{O}_2$  w spalinach [%]
- stężenie pyłów (PM) [ $\text{mg}/\text{m}^3$  dla 10%  $\text{O}_2$ ]
- temperatura spalin [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- sprawność cieplna [%]

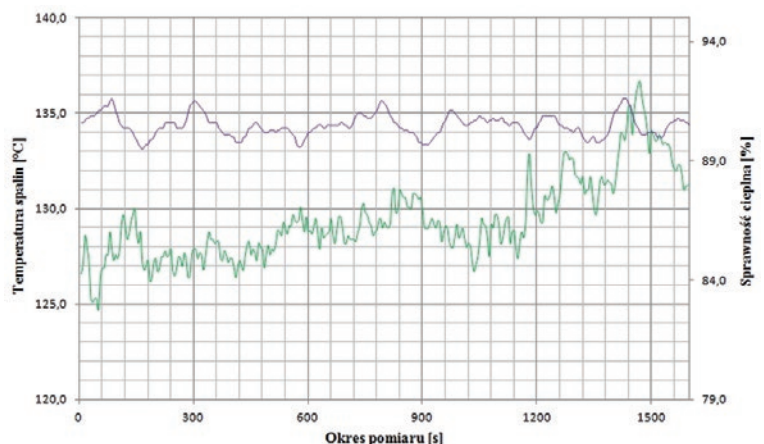
Rys. 3. Oznaczenia na wykresach  
Fig. 3. Markings on charts



Rys. 4. Emisja pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 1  
Fig. 4. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 1



Rys. 5. Emisja pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 1  
Fig. 5. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 1



Rys. 6. Temperatura spalin oraz sprawność cieplna kotła w zależności od czasu – cykl pomiarowy 1  
Fig. 6. Flue gas temperature and thermal efficiency of the boiler depending on time – measuring cycle 1

liwa i spalanie w poszczególnych cyklach badawczych paliwa o różnych właściwościach mogło mieć znaczący wpływ na otrzymane wyniki.

Pierwszy cykl badań polegał na wykonaniu pomiarów ciepłno-emisyjnych kotła dostarczonego przez producenta. W trakcie tych pomiarów nie ingerowano w konstrukcję części konwekcyjnych kotła. Celem tych badań było wyznaczenie parametrów wyjściowych pracy kotła oraz zweryfikowanie informacji o spełnianiu przez konstrukcję deklarowanych parametrów eksploatacyjnych. Otrzymałą w trakcie badań emisję pyłów przeliczono zgodnie z normą na stężenie substancji w spalinach przy 10% zawartości tlenu.

Przebiegi wyników pierwszego cyklu badań pokazano na rys. 4, 5 i 6. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono stężenia pyłów oraz zawartość tlenu w spalinach, a na rysunku 6 przebieg temperatury spalin oraz sprawności cieplnej.

Wyniki zbiorcze – średnie arytmetyczne z całego pierwszego cyklu badawczego poszczególnych zmiennych przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Średnia arytmetyczna wartość wybranych parametrów pracy kotła – cykl pomiarowy 1

TABLE 1. Arithmetic mean for selected parameters of boiler work – measuring cycle 1

Pierwszy cykl pomiarowy		
Parametr	wartość	j.m.
PM	$34,0 \pm 2,1$	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	$14,1 \pm 0,8$	%
$\eta_c$	$90,5 \pm 0,5$	%
$t_{sp}$	$130,0 \pm 1,0$	°C

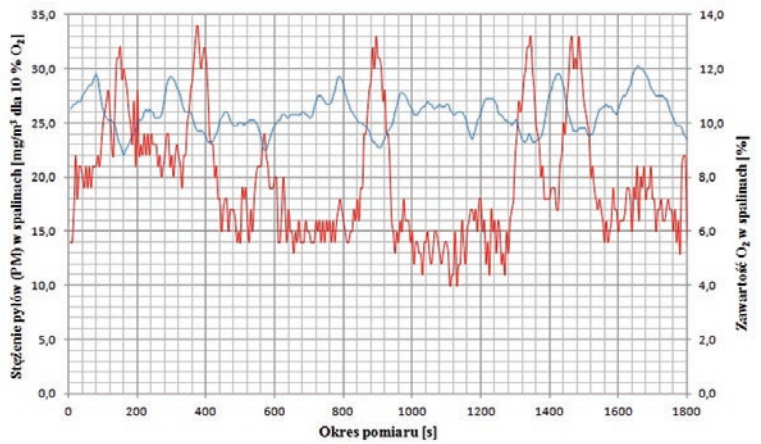
W pierwszym cyklu pomiarowym otrzymane stężenie pyłów mieści się w zakresie określonym w normie. Ponadto wyznaczona sprawność cieplna kotła jest zadowalająca, ponieważ jest wyższa o 3% niż wymagana przez normę.

Z badań pierwszego cyklu wynika, że dostarczony przez producenta kocioł spełnia wymagania obecnych przepisów, jednak uzyskane wyniki są zbliżone do poziomu bliskich wartości granicznych, co w przypadku zastosowania paliwa o niskiej jakości skutkuje zwiększoną emisją substancji szkodliwych. Więcej informacji na temat wpływu jakości paliwa na poziom emisji substancji szkodliwych można znaleźć w [2], [5].

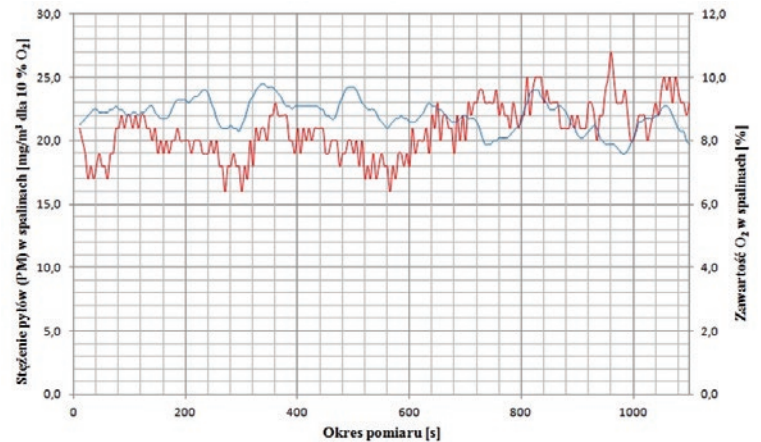
Z analizy otrzymanych wyników widzimy, że proces dostarczania tlenu do palnika jest nierównomierny. Krzywe ilustrujące stężenie tlenu w spalinach mają dużą fluktuację, a wahania stężenia tlenu w dosyć krótkim czasie (około 50 s) zmieniają się o co najmniej 2%. Natomiast poziom stężenia tlenu w spalinach odlotowych jest wysoki i wynosi od 13,5% do około 16%.

Stan ten może być wynikiem następujących zjawisk:

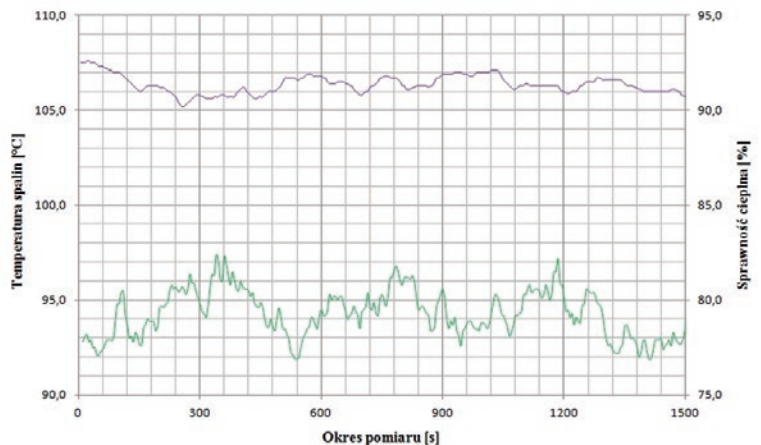
- nierównomiernego podawania paliwa do palącego się złoża,
- niewłaściwej konstrukcji paleniska,
- szybkiego przepływu powietrza z części paleniskowej do czopucha.



Rys. 7. Emisja pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 2  
Fig. 7. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 2



Rys. 8. Emisja pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 2  
Fig. 8. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 2



Rys. 9. Temperatura spalin oraz sprawność cieplna kotła w zależności od czasu – cykl pomiarowy 2  
Fig. 9. Flue gas temperature and thermal efficiency of the boiler depending on time – measuring cycle 2

Czynniki te powodują niewykorzystanie znacznej ilości tlenu w procesie spalania.

Najczęściej jednak spotykamy jednocześnie wystąpienie kilku z tych zjawisk, co w konsekwencji powoduje trudność w modelowaniu i badaniu procesów spalania paliw stałych. Obserwujemy również duże fluktuacje stężenia pyłów w spalinach odlotowych. Poziom stężenia pyłu w spalinach

zawarty jest w przedziale od około 20 mg/m<sup>3</sup> do nawet 90 mg/m<sup>3</sup>, co sugeruje, że proces spalania przebiega niewłaściwie. Średnia arytmetyczna stężenia pyłów w spalinach wyniosła 34 mg/m<sup>3</sup>. Na wykresach można zaobserwować, że im większe jest spadek stężenia tlenu w spalinach, tym większe jest chwilowe stężenie emitowanych pyłów; np. od 1500 s – rys. 2 oraz od 650 s – rys. 3. W momencie, gdy spadek stężenia tlenu w spalinach nie jest gwałtowny lub jego poziom jest niewielki, to ilość emitowanych pyłów wzrasta minimalnie lub utrzymuje się na jednakowym poziomie. Obserwacje te pokazują, że główną przyczyną zmiany poziomu emitowanych pyłów jest ilość powietrza dostarczanego do paleniska. Inną przyczyną dużego stężenia pyłów w spalinach jest niewłaściwie dobrany stosunek ilości podawanego paliwa do poziomu napowietrzenia złoża. W rozważanym przypadku możemy sądzić, że główną przyczyną takiego stanu jest niewłaściwa ilość paliwa dostarczanego do paleniska, a dokładniej jego nadmiar w okresowej dawce podawczej. Zjawisko to powoduje chwilowy wzrost:

- ilości emitowanych substancji szkodliwych,
- spadku zawartości tlenu w spalinach,
- widoczny przyrost temperatury spalin.

Ostatni czynnik powoduje nadmierną ilość ciepła emitowanego ze spalin. Jedną z metod zapobiegania temu zjawisku może być zmiana konstrukcji systemu podawania paliwa lub zastosowanie turbulatorów spalin, jako doraźnej metody obniżenia zapylenia spalin i podniesienia sprawności cieplnej urządzenia.

Drugi cykl badań polegał na zainstalowaniu w co drugiej rurze trzeciego ciągu konwekcyjnego turbulatora spalin. W badaniach zastosowano turbulatory o kształcie spiral. Były one wykonane z wysokogatunkowej stali odpornej na wysoką temperaturę. Turbulatory zostały zamontowane tak, że stykały się z ścianką wewnętrzną rury a odległość między kolejnymi zwojami wynosiła około 20 mm. Wyniki badań drugiego cyklu przedstawiono na rys. 7, 8 i 9. Na rysunkach 7 i 8 pokazano stężenia pyłów oraz zawartość tlenu w spalinach w zależności od czasu pomiaru, a na rys. 9 temperaturę spalin oraz sprawność cieplną kotła.

Wyniki zbiorcze drugiego cyklu pomiarowego – średnie arytmetyczne z całego cyklu badawczego dla poszczególnych zmiennych przedstawiono w tabeli 2.

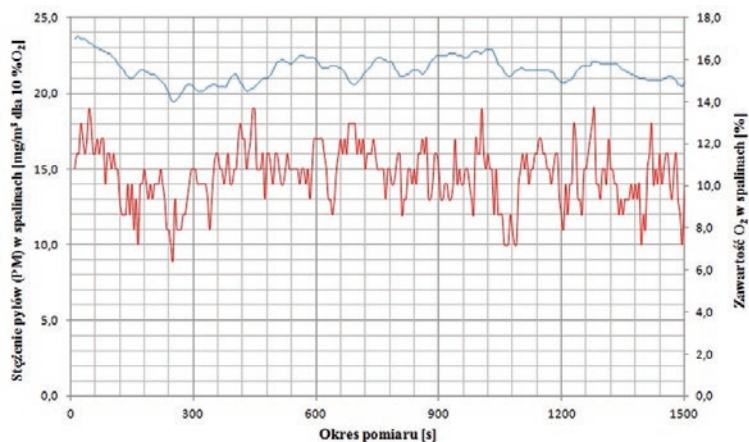
**TABELA 2. Średnie arytmetyczne wartości dla wybranych parametrów pracy kotła – cykl pomiarowy 2**

**TABLE 2. Arithmetic mean for selected parameters of boiler work – measuring cycle 2**

Drugi cykl pomiarowy		
Parametr	wartość	j.m.
PM	22,0 ± 1,7	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	9,4 ± 0,8	%
η <sub>c</sub>	91,4 ± 0,8	%
t <sub>sp</sub>	94,3 ± 1,1	°C

W drugim cyklu badawczym, z turbulatorami zamontowanymi w kotle obserwujemy znaczące zmniejszenie ilości emitowanych pyłów oraz zwiększenie sprawności cieplnej kotła.

W przypadku zawartości tlenu w spalinach obserwujemy jej ustabilizowanie w porównaniu z wynikami otrzymanymi dla kotła bez turbulatorów. W badaniu



**Rys. 10. Emisji pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 3**  
**Fig. 10. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 3**

fluktuacje tego parametru są mniejsze niż 2%, co jest wynikiem korzystniejszym niż w przypadku pierwszego cyklu badań, w których wahania stężenia tlenu przekraczały 2%. Stężenie tlenu w warunkach pracy palnika wynosiło od około 8% do 10%. Dzięki zastosowaniu turbulatorów przepływ spalin od palnika do czopucha został zaburzony i dodatkowo zdławiony, co spowodowało spowolnienie przepływu powietrza w palenisku i lepsze wykorzystanie tlenu w procesie spalania. Emisja pyłów w czasie pomiarów wyniosła średnio 22 mg/m<sup>3</sup>; przy czym wahała się w przedziale od 10 mg/m<sup>3</sup> do 35 mg/m<sup>3</sup> co jest znacznie lepszym wynikiem niż otrzymanym w pierwszym cyklu.

Z wyników badań widzimy, że bardziej stabilne są przebiegi zarówno stężenia tlenu, jak i pyłu w spalinach. Tak jak w pierwszym cyklu, tak i w drugim, widać, że gdy gwałtownie spada zawartość tlenu w spalinach, to stężenie pyłów wzrasta. Jednak w przypadku zastosowania turbulatorów spalin pewna ilość pyłów i sadzy zostaje wytrącona w części konwekcyjnej kotła.

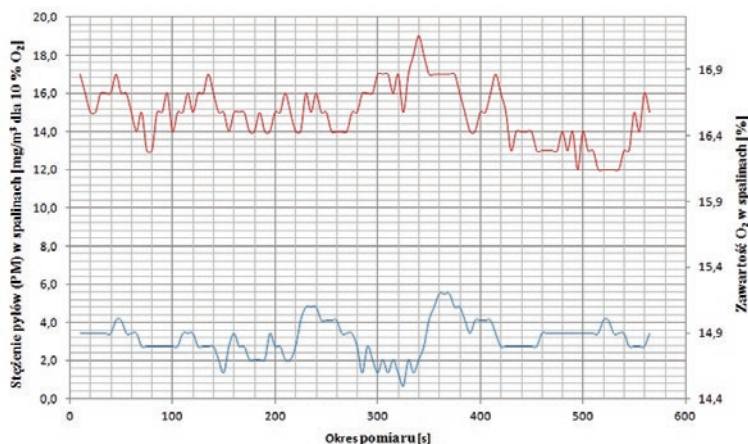
Dodatkowo turbulencja przepływu spalin zwiększa intensywność procesu wymiany ciepła, co skutkuje obniżeniem temperatury spalin wylotowych oraz zwiększeniem sprawności cieplnej kotła. Temperatura spalin zostaje obniżona z 130°C do około 95°C, co skutkuje lepszym wykorzystaniem energii chemicznej paliwa i poprawę sprawności cieplnej kotła.

W trzecim cyklu badań zamontowano w każdej rurze trzeciego ciągu konwekcyjnego turbulator spalin. Turbulatory były wykonane w taki sam sposób jak stosowane w cyklu drugim. Wyniki badań trzeciego cyklu zaprezentowano na rysunkach 10, 11 i 12, a na rys.10 i 11 stężenia pyłów oraz zawartość tlenu w spalinach. Na rysunku 12 pokazano zmiany temperatury spalin oraz sprawności cieplnej kotła w czasie pomiaru.

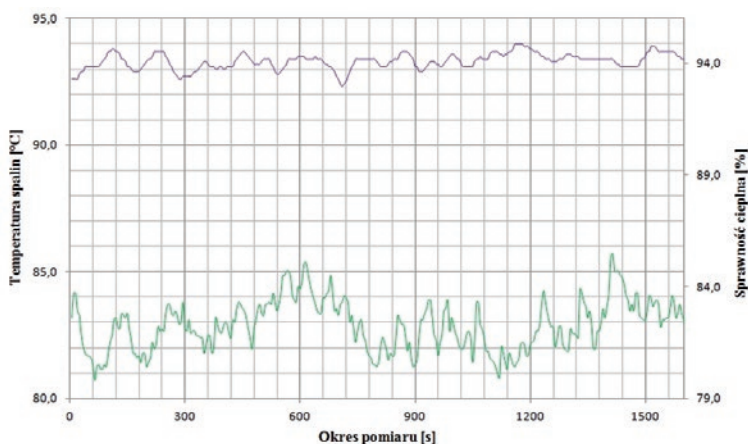
Wyniki zbiorcze trzeciego cyklu pomiarowego – średnie arytmetyczne z całego cyklu badawczego poszczególnych zmiennych przedstawiono w tabeli 3.

W trzecim cyklu pomiarowym, z zastosowanymi turbulatorami w całości trzeciego ciągu konwekcyjnego obserwujemy jeszcze lepszą poprawę pracy kotła. Występuje znaczne zmniejszenie ilości emitowanych pyłów oraz znaczna poprawa sprawności cieplnej kotła.

Zawartość tlenu w spalinach w porównaniu z wynikami badań kotła bez turbulatorów, jest również ustabilizowana. Poziom fluktuacji tego parametru wynosi ok.1%, co jest również korzystne jak w przypadku drugiego cyklu badań.



Rys. 11. Emisji pyłów (PM) w zależności od czasu – cykl pomiarowy 3  
Fig. 11. The dust emission (PM) depending on time – measuring cycle 3



Rys. 12. Temperatura spalin oraz sprawność cieplna kotła w zależności od czasu – cykl pomiarowy 3  
Fig. 12. Flue gas temperature and thermal efficiency of the boiler depending on time – measuring cycle 3

TABELA 3. Średnia arytmetyczna wartości wybranych parametrów pracy kotła – cykl pomiarowy 3

TABLE 3. Arithmetic mean for selected parameters of boiler work – measuring cycle 3

Trzeci cykl pomiarowy		
Parametr	wartość	j.m.
PM	$16,0 \pm 1,9$	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	$14,6 \pm 0,8$	%
$\eta_c$	$93,3 \pm 0,6$	%
$t_{sp}$	$82,4 \pm 1,0$	°C

Dzięki zastosowaniu turbulatorów w całym trzecim ciągu przepływ spalin od palnika do czopucha został całkowicie zaburzony. Zastosowanie turbulatorów w każdej rurze trzeciego ciągu pozwoliło na wykorzystanie maksymalnej ilości ciepła ze spalin i podniesienia sprawności cieplnej urządzenia. Temperatura spalin wyniosła około 83°C, co grozi możliwością skraplania pary wodnej w niez izolowanym przewodzie kominowym. Zjawisko to może być przyczyną wystąpienia ognisk korozji zarówno w kotle, jak i przewodzie spalinowym. Emisja pyłów w trakcie pomiarów wyniosła średnio 16 mg/m<sup>3</sup>. Poziom emisji wahał się w przedziale od 10 mg/m<sup>3</sup> do 20 mg/m<sup>3</sup>, co jest znaczą-

co lepszym wynikiem niż otrzymane w poprzednich cyklach pomiarowych.

Z otrzymanych wyników badań widać, że przebiegi zarówno stężenia tlenu, jak i stężenia pyłów są stabilne. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach widzimy zależność gdy gwałtownie spada zawartość tlenu w spalinach stężenie pyłów wzrasta. W przypadku zastosowania turbulatorów spalin większość pyłów i sadzy zostaje wytrącona w części konwekcyjnej kotła.

## 5. Wnioski

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie wpływu zawirowania strugi spalin wylotowych w części konwekcyjnej kotła grzewczego na emisję pyłów oraz poprawę sprawności cieplnej urządzenia. Obiektem badań był wodny niskotemperaturowy kocioł grzewczy, z palnikiem peletowym. Z przeprowadzonych badań widzimy, że istnieje zależność między zawirowaniem strugi spalin a ilością emitowanych pyłów. Okazało się, że jedną z nieinwazyjnych metod zapewniającą obniżenie zapylenia spalin odlotowych z kotła grzewczego na pelet jest zastosowanie turbulatorów spalin. Turbulatory powodują wzrost burzliwości przepływu spalin wpływając na wytrącanie zawartych w nich pyłów oraz podniesienie sprawności cieplnej kotła. Zmniejszenie stężenia emitowanych pyłów przez kotły z turbulatorami w porównaniu z konstrukcjami bez nich jest znaczące. Stosując turbulatory spalin i odpowiednią regulację palnika udało się obniżyć ponad dwukrotnie stężenie pyłów w spalinach. W przypadku sprawności cieplnej, zastosowanie turbulatorów wpłynęło na jej podniesienie o 3%, co stanowi zadowalający wynik. Podsumowując, zastosowanie turbulatorów spalin w kotłach grzewczych na paliwa stałe jest celowe, gdyż z przeprowadzonych badań wynika, że elementy te wpływają znacząco na poprawę pracy urządzenia pod względem cieplno-emisyjnym. Otrzymane wyniki mogą być pomocne dla producentów i eksploatorów kotłów grzewczych dążących do ograniczenia ilości emitowanych substancji szkodliwych.

## LITERATURA

- [1] Bartoszewicz J., R. Urbaniak. 2010. Analiza wpływu konfiguracji ustawień sterowania na pracę kotła małej mocy. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 41 (8): 241-246.
- [2] Ciupek B., R. Urbaniak, J. Bartoszewicz. 2018. „Emisja tlenu węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (3): 90-94.
- [3] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze – Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- [4] Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189, w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwa stałe.
- [5] Urbaniak R., J. Bartoszewicz, R. Kłosoński. 2015. „Main Causes of NOx Emission by Low-Power Boilers”. *Polish Journal of Environmental Studies*, (24): 2223-2230.

# Optimization of the Retort Burner Construction to Reduce Emission of Harmful Substances

*Optymalizacja konstrukcji palnika retortowego w aspekcie obniżenia emisji substancji szkodliwych*

DOI: 10.15199/9.2018.12.8

**BARTOSZ CIUPEK**  
**RAFAŁ URBANIAK**

**Keywords:** heating boilers, retort burner, emission, harmful substances

## Abstract

The article presents an analysis of the possibilities of optimizing the retort burner design about emitted harmful substances. The selected research facility is characterized by a much higher level of emitted harmful substances in relation to the currently valid standard in the solid fuel heating devices. A first generation retort burner with a fixed air rim was used for the tests. The main task posed to these elements are: formation of the combustion fuel bed and supplying secondary air to the combustion process. The constructions found on the market differ in the geometrical model of the secondary air supply system to the furnace. During the tests, the boiler was used as the installation site for the retort burner and a reference point for measuring the concentration of harmful substances emitted. The burner operation was controlled using a microprocessor temperature controller. The aim of the research was to check whether the change of the shape and the angle of outflow of secondary air in the burner will affect the significant reduction of emitted substances. In order to achieve the assumed goals, specially made steering overlay were used to determine the optimal angle of the outflow of air creating in the furnace a stream of receding exhaust gas. The article describes the research methodology and analysis of the results obtained. The effect of the conducted tests is to determine the range of the angle of air outflow in the furnace creating the recoil stream. Obtaining such a flue gas distribution allowed to significantly reduce the level of harmful substances emitted.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
All right reserved

**Słowa kluczowe:** kotły grzewcze, palnik retortowy, emisja, substancje szkodliwe

## Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę możliwości optymalizacji konstrukcji palnika retortowego w aspekcie zmniejszenia emisji substancji szkodliwych. Wybrany obiekt badań charakteryzował się znacznie wyższym poziomem emisji substancji szkodliwych niż dopuszczają stosowne normy. Obiektem badań był palnik retortowy pierwszej generacji z powietrzną koronką stałą. Głównym zadaniem tych elementów są: ukształtowanie złoża spalanego paliwa oraz doprowadzenie powietrza wtórnego do procesu spalania. Spotykane na rynku konstrukcje różnią się modelem geometrycznym układu dostarczania powietrza wtórnego do paleniska. Badany palnik retortowy zainstalowany w kotle grzewczym, stanowi punkt odniesienia do pomiaru stężenia emitowanych substancji szkodliwych. Praca palnika była sterowana za pomocą mikroprocesorowego regulatora temperatury. Celem badań było sprawdzenie czy zmiana ukształtowania oraz kąta wypływu powietrza wtórnego w palniku spowoduje ograniczenie emisji szkodliwych substancji. Do osiągnięcia założonych celów posłużono się specjalnie wykonanymi nakładkami kierowniczymi mającymi za zadanie utworzenie optymalnego kąta wypływu powietrza tworzącego w palenisku cofniętą strugę spalin. W artykule opisano metodologię badań oraz wykonano analizy otrzymanych wyników. Efektem przeprowadzonych badań jest wyznaczenie zakresu kąta wypływu powietrza w palenisku tworzącego cofniętą strugę spalin. Uzyskanie takiego rozkładu spalin pozwoliło na znaczące obniżenie emisji do otoczenia substancji szkodliwych.

## 1. Introduction

The heating season in Poland is associated with a noticeably drastic deterioration of air quality. The main reason for this phenomenon is the low emission caused by improperly conducted combustion process in solid fuel

heating appliances. One of the elements related to low emission is the combustion of poor quality fuel. More information's about quality of combustion process and fuels for boilers can be found in publications [4], [6], [7], [14]. Combustion of such fuel in boilers equipped with insufficiently efficient emission burners causes a worsening of the problem with the air quality in the heating season. The introduction of new restrictions on the quality of the combustion process from the boiler structure that does not include restrictions on retort burners causes some inhibition of the development of these structures. Many of the existing burner designs on the market are outdated

MSc Eng. **Bartosz Ciupek**; osoba do kontaktu:  
bartosz.r.ciupek@doctorate.put.poznan.pl  
PhD Eng. **Rafał Urbaniak**  
Poznan University of Technology, Faculty of Transport Engineering,  
Chair of Thermal Engineering, Piotrowo 3, 60-965 Poznan, Poland

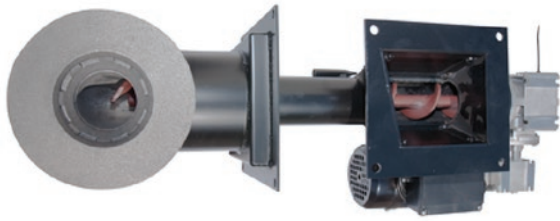


Fig. 1. An example of a first generation retort burner  
Rys. 1. Przykład palnika retortowego pierwszej generacji

and can't cope with current restrictions. There are many ways to limit the amount of harmful substances emitted. The basic ones are using high quality fuel, changing the burner to a low-emission construction or rebuilding an old structure. In order to check whether it is possible to adapt older constructions to current standards, actions have been taken to determine the average emission level of harmful substances and a number of engineering works have been undertaken to improve the design of the burner. In the experiment, retort burners of the first generation were used. The burner is presented in figure 1. The first generation burners are the dominant structures in Polish heating. They are characterized by simple construction but also high level of emitted harmful substances. They are equipped with a constant secondary air supply rim. The first generation burner is equipped with directed air vents, however the angle of air flow for them is 0 degrees, which does not cause the formation of a stream. More information on the operation of retort burners can be found in publications [5], [8], [10], [11], [15]. The structural analysis was carried out for the selected structure and the concentrations of harmful emissions were measured. The next stage of the research was fixing the first-generation steering overlay on the upper part of the burner and finding the optimal angle of the air outlet to the bed so as to obtain a reversible air stream. This operation was aimed at obtaining a uniform flame which would cause burning of dust escaping from the furnace. The last stage was to rebuild the air rim for the old structure by applying air holes on its circumference with the pre-determined optimal angle of air outflow. The final stage was to perform tests of the dust concentration in the flue gases for the improved structure.

## 2. Aim

The aim of the research was to check whether it is possible to reduce the emission of harmful substances from the retort burner by re-designing the air rim to form a recycle gas stream.

## 3. Methods

The first-generation retort burner equipped with a rotary air rotor was used for the experimental tests. Its structural analysis was carried out and then concentrations of harmful emissions such as CO, NO<sub>x</sub> and dust pollution were measured. The first step of research was to determine the characteristics of the air supplied to the furnace. The next step of research was to find the optimal angle of air outflow to the furnace creating the recycle stream. To achieve this, a steering overlay applied to the burner rim was used. After finding such an inclination of the air holes forming the recessing plan, air holes were made in the rim. The final stage was to conduct the exhaust gas analysis for the



Fig. 2. View of the heating boiler with the test stand  
Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

construction with the improved aeration system of the bed while maintaining identical parameters of the burner operation. The individual stages of the research and the methods used in them were presented below.

The first generation retort used for the tests was a PPS 25 kW Standard burner. This burner consists of a cast iron ring of the furnace placed in a cast iron plate, the whole is placed on a cast iron retort. The wreath used in the burner consists of eight air holes whose geometry has a semicircular shape and the cross-section is square. Fuel delivery to the rim takes place through a cast iron elbow with an arc of 90°. The fuel outlet opening in the furnace expands at an angle of approximately 20° in the direction of fuel lift. Such shaped hearth allows to slow down the flow of fuel to the furnace. The task of the rim is to distribute the air supplied by the air chamber to the burning bed. The combustion process takes place inside of it. In order to examine the emission of harmful substances from the burner, it was placed in a boiler type Q Eco 15. The view of the boiler with a test stand is presented in figure 2. The location of air channels in the top part of the rim causes hypoxia of the bed. From the tests and observations carried out, such an air dosing system is imprecise because at the moment of burning the fuel below the level of openings some part of the air does not participate in the combustion process, additionally cooling the flame. In addition, an excessive amount of air that does not participate in the combustion process contributes to its disruption. These situations contribute to the hypoxia of the deposit and increase of the level of harmful substances emitted.

In order to improve the design of the first-generation burner was used an overlay with cuts forming the air grip. The steering overlay was made of 0.5 mm thick steel sheet with eight L-shaped notches. The view of the overlay used is shown in Figure 3.

The application of the overlay made it possible to examine the profile of the outflow of air to the furnace for vari-



Fig. 3. View of the overlays used in tests  
Rys. 3. Widok nakładek kierowniczych używanych w testach

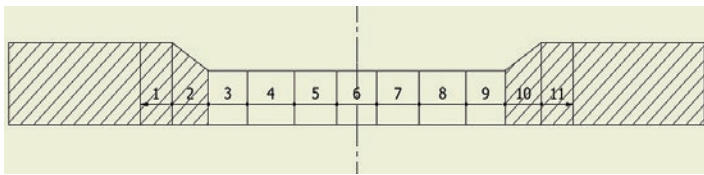


Fig. 4. View of the division of standard retort rim used in tests  
Rys. 4. Widok podziału wieńca napowietrzającego używanego w testach

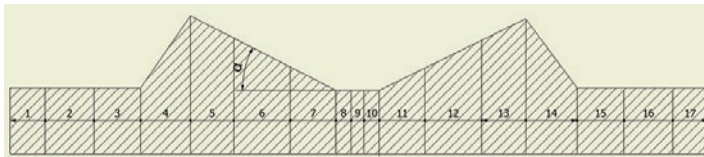


Fig. 5. View of the division of overlay used in tests  
Rys. 5. Widok podziału kierownicy używanej w testach

ous deflections of the guide vanes. The tests were carried out for various configurations of the burner and steering overlay. The tests without the overlay were used to determine the velocity profile of the outgoing air from the rim during the normal burner operation. In the case of tests with the steering overlay, an optimal angle of air outflow was created, creating a reversible plane.

The base of the steering overlay was 30 mm long and the longer arm 50 mm. The overlay was fixed permanently to the cast-iron fireplace plate. Steering wafers were bent from 20° in the direction of air outflow at every 10°. Air distribution tests were made across the outgoing air. The final stage of the research was to determine the optimal angle of air flow resulting in the maximum return of the stream. The distribution of the outgoing air was measured by a micromanometer with a Pitot probe for the air rim divided into 11 sections. The method of dividing the rim without a overlay is presented in Figure 4.

For measurements with mounted steering overlay, the cross-section of the burner was divided into 17 sections in which measurements were taken. The method of dividing the furnace with the used steering overlay is presented in Figure 5.

In the thermal and emission studies was applied the methodology described in PN-EN 303-5: 2012. In the tests was used black coal. Fuel was stabilized before the tests under the same laboratory conditions. The coal was used with the parameters: calorific value  $H_s = 29$  MJ/kg, total humidity  $W_c = 10\%$  number of Rogi = 0 – 20. The obtained test results were compared with the currently valid regulations regarding emissions of harmful substances from boilers. According to the standard [9], the emission of individual harmful substances from boilers with automatic feeding of fuels made in the fifth class should not be greater than:  $CO = 500$  mg/m<sup>3</sup>;  $NO_x = 350$  mg/m<sup>3</sup>;  $PM = 40$  mg/m<sup>3</sup>. All conversion of substance concentrations should be performed for 10% oxygen content in the exhaust gases. The tests assume that for the revised structure, the arithmetic mean of emission of harmful substances from the entire test cycle shouldn't exceed the maximum values. In each test cycle, constant and uniform parameters of boiler operation were maintained, while during the measurements the boiler operation settings were not interfered with. Extended information on operation and

testing of boilers can be found in [1, 2, 3, 12, 13]. The flow temperature of the water was maintained on average at about 70°C, and on the average return about 55°C; the temperature difference was around 15°C. During the research, the same environmental conditions prevailed. The burner operation was controlled by means of a microprocessor control system. This solution enabled a smooth change of the fuel supply and air settings in the burner, so as to obtain the same operating parameters in each test. The reference measuring apparatus was used to measure selected emission parameters of the exhaust gas. The emission value was determined as the arithmetic mean of individual measurements in the entire cycle.

The research laboratory was equipped with a system of heat exchangers used to receive the energy generated during the research. The thermal power of the boiler was determined by means of a system consisting of four heat exchangers connected in series, the rated heat output of each exchanger was 50 kW. Five thermocouples for measuring exhaust temperature were installed in the chimney. The final exhaust temperature was determined as the arithmetic mean. In addition, an electromagnetic flowmeter and thermocouples were used to measure the temperature of water on the supply and return from the boiler. In addition to estimating the thermal power delivered by the heating water, the mass flow of cooling water to the exchangers was measured. During each of the research cycles, after obtaining the required thermal parameters, the device operation was stabilized and the exhaust gas analysis was performed.

## 4. Results

### 4.1 The results of the air speed profile

The tests of the air speed profile for the burner in the producer's version have been carried out for rotational speed of the blast fan rotor in the range of 10 – 100% with a step of 10%. The obtained air distribution is presented in Figure 6.

The obtained results show that the highest air velocity falls for 100% of the fan set point and is equal to 0.85 m/s. The maximum speed values are shifted from the central point (number 6) to the spherical point (number 7) located above the upper side of the retort entering the burner. Between points number 1 and 4 you can see a smaller air flow velocity with respect to their symmetry

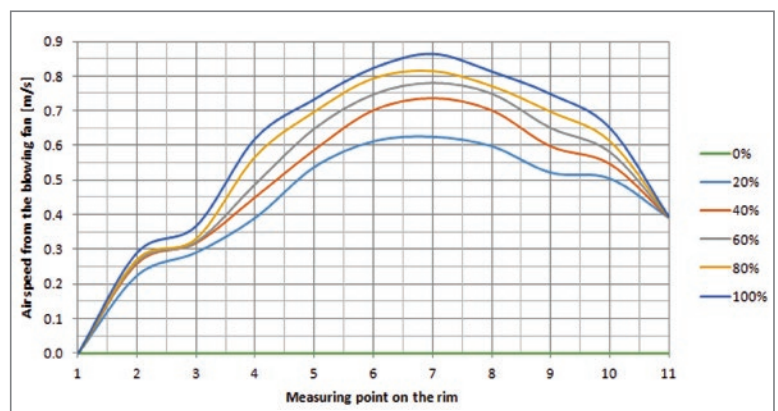


Fig. 6. View of the air velocity relative to the rotational speed of the fan  
Rys. 6. Rozkład prędkości powietrza względem punktu pomiarowego przy różnych prędkościach wentylatora podmuchowego

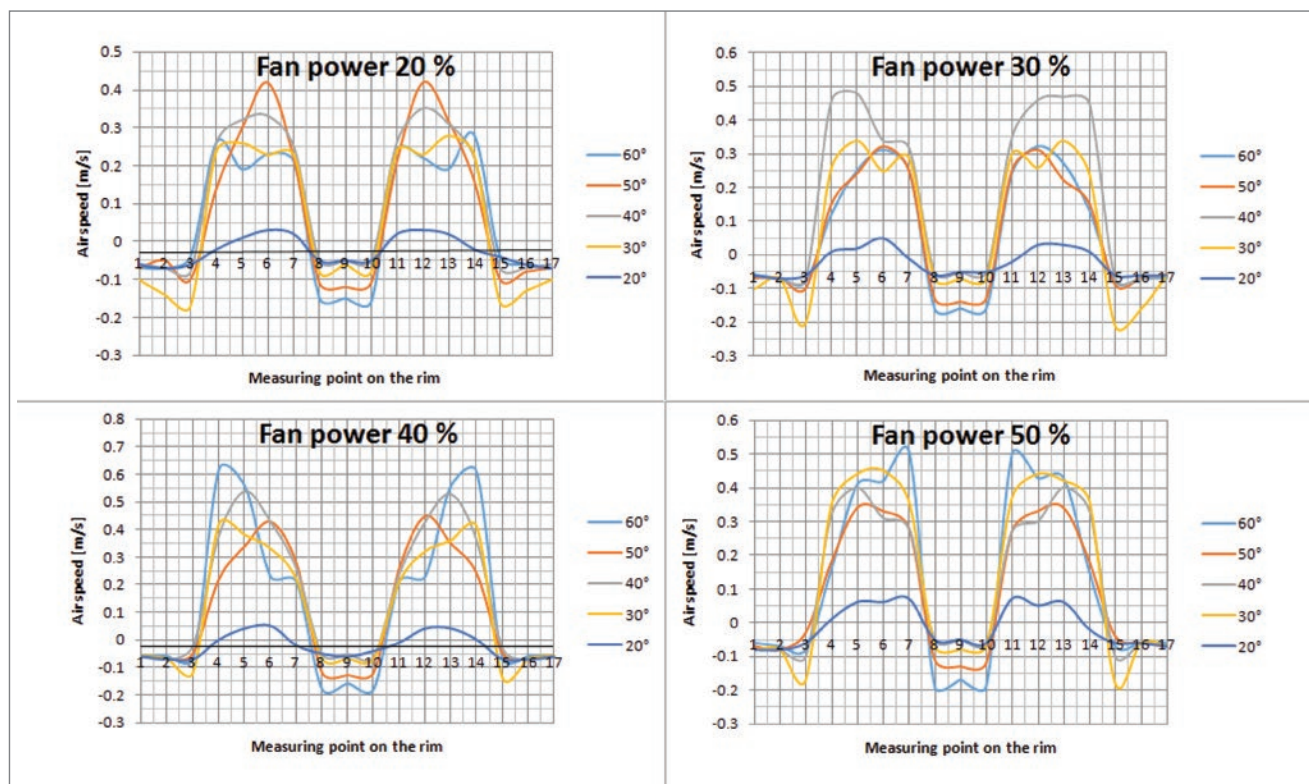


Fig. 7. View on the course of dynamic pressure at a given measuring point in relation to the deflection angle of the steering flaps in the overlay  
Rys. 7. Rozkład prędkości powietrza przy różnych odchyleniach nakładek kierowniczych

for points 8 to 11. The reason for this behavior of the gas stream is the retort knee located there, which causes the air stream to decelerate. This study showed that the furnace construction itself is inaccurate and some of the furnace above the retort knee may have air shortages due to the reduced air flow velocity. This situation results in uneven oxygenation of the bed, which in turn causes periodic increase of emitted harmful substances during the device's working cycle.

Tests for the burner with the air deflector used were carried out for angles of blade deflection from 20° to 60° every 10°. In addition, the rotor fan speed was changed from 20% to 50% every 10% for each deflection of the guide vanes. The courses obtained are presented in Figure 7.

The obtained characteristics show that the largest retraction of the air stream was obtained for a discharge angle of 60°. Directing an exhaust stream in the furnace in this respect should lead to a significant reduction of emitted pollutants by returning a certain amount of gases in the center of the flame which will cause them to be burned. Guided by these premises, air holes were made at a predetermined angle. The vertical orientation of the openings is 60° and the horizontal deviation is 30°. The angle of horizontal deviation resulted from the complementation of the angle of the long side of the steering overlay to the base forming the air outlet opening which was adopted at the level of 60°. The whole had to converge to a 90° angle.

#### 4.2 The results of the tests of the concentration of the harmful substances in the exhaust gases

During the individual test stages, it was tried to maintain the same thermal conditions of the system and to apply the same air supply settings (fan speed) and the amount of fuel fed to the furnace.

TABLE 1. The arithmetic mean of emissions of harmful substances and oxygen for the basic version

TABELA 1. Średnia arytmetyczna wartości emisji substancji szkodliwych i tlenu z palnika w podstawowej wersji

Substance	Unit	Value	Value of the standard
CO	mg/m <sup>3</sup>	162	500
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	431	350
PM	mg/m <sup>3</sup>	147	40
O <sub>2</sub>	% vol.	11	-

The first object tested was a retort burner without structural changes. The course of emission of harmful substances that was obtained can be treated as input data regarding the amount of harmful substances emitted. The boiler plus boiler system was subjected to four test sessions of 30 minutes each, which gives a total of 2 hour measurements. The obtained average concentrations of emitted harmful substances are presented in Table 1.

The obtained results deviate from the assumptions of the standard for boilers made in the fifth class. The obtained average dust pollination exceeds the standard four times. On the other hand, the concentration of nitrogen oxides exceeded the value of the standard by 80 mg/m<sup>3</sup>. Such a high emission of harmful substances shows that the first generation burners used in boilers do not meet the requirements of low-emission constructions in any aspect and they should be subjected to a comprehensive verification of construction parameters and steps should be taken to modernize them. The results obtained also confirmed the correctness of the measures taken to redevelop the burner part. The waveforms for the tested burner are presented in figures 8, 9 and 10.

The second stage of the research was to conduct a flue gas analysis for a structure with a rebuilt secondary air



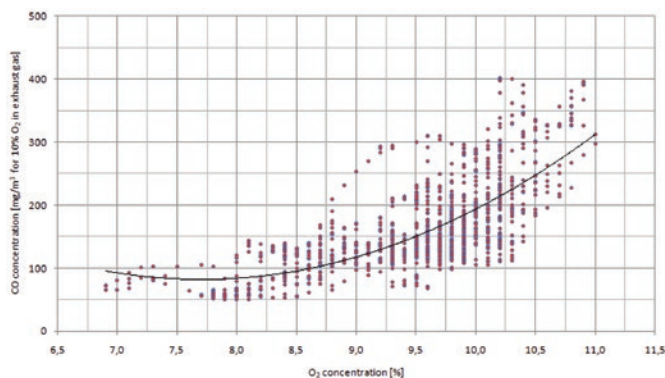


Fig. 8. The course of CO emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with standard air rim  
Rys. 8. Emisja CO w zależności od zawartości tlenu z palnika ze standardowym wieńcem powietrznym

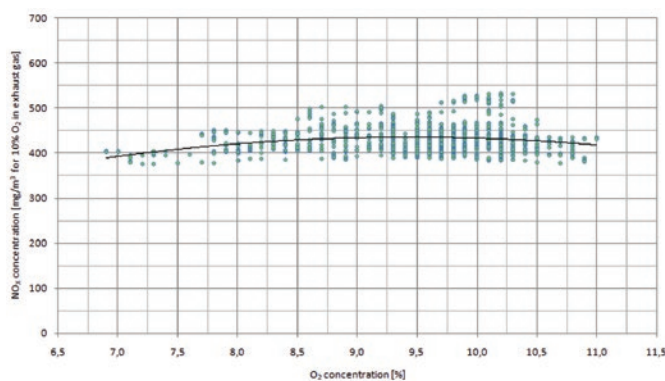


Fig. 9. The course of NO<sub>x</sub> emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with standard air rim  
Rys. 9. Emisja NO<sub>x</sub> w zależności od zawartości tlenu z palnika ze standardowym wieńcem powietrznym

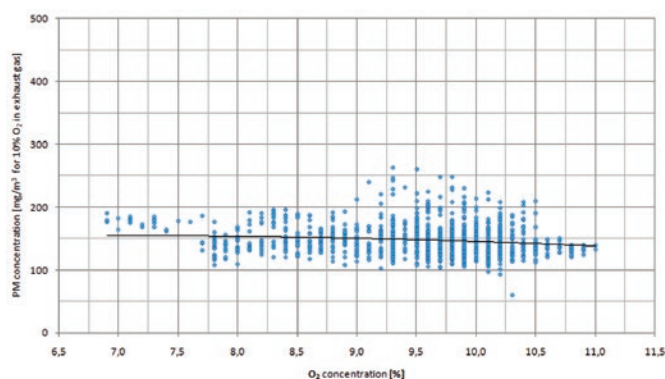


Fig. 10. The course of PM emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with standard air rim  
Rys. 10. Emisja pyłów w zależności od zawartości tlenu z palnika ze standardowym wieńcem powietrznym

TABLE 2. The arithmetic mean of emissions of harmful substances and oxygen for the optimized design  
TABELA 2. Średnia arytmetyczna wartości emisji substancji szkodliwych i tlenu z palnika o zoptymalizowanej konstrukcji

Substance	Unit	Value	Value of the standard
CO	mg/m <sup>3</sup>	92	500
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	305	350
PM	mg/m <sup>3</sup>	37	40
O <sub>2</sub>	% vol.	7	-

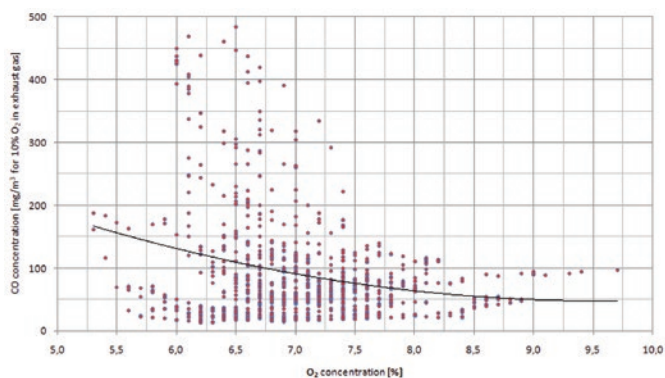


Fig. 11. The course of CO emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with optimized air rim  
Rys. 11. Emisja CO w zależności od zawartości tlenu z palnika z zoptymalizowanym wieńcem powietrznym

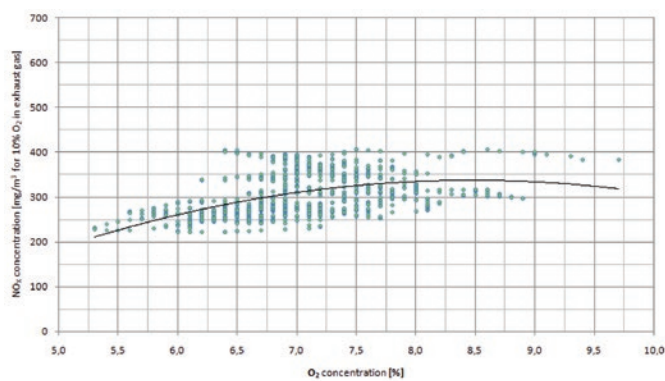


Fig. 12. The course of NO<sub>x</sub> emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with optimized air rim  
Rys. 12. Emisja NO<sub>x</sub> w zależności od zawartości tlenu z palnika z zoptymalizowanym wieńcem powietrznym

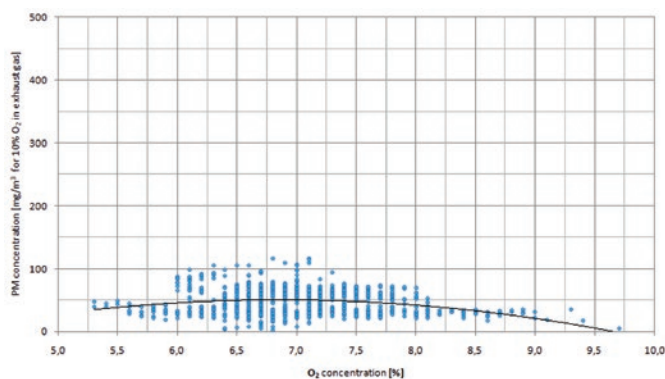


Fig. 13. The course of PM emission in relation to the oxygen concentration for retort burner with optimized air rim  
Rys. 13. Emisja pyłów w zależności od zawartości tlenu z palnika z zoptymalizowanym wieńcem powietrznym

feed rim. The old air holes were blinded with high-temperature silicone. As a result, the air was sent to the furnace only through previously prepared openings. As before, four measuring sessions of 30 min each were carried out. The obtained average concentrations of emitted harmful substances are presented in Table 2.

Distributions of emitted harmful substances are presented in figures 11, 12 and 13.

The obtained results of harmful substances concentrations for the optimized construction allowed to meet the requirements for five-class boilers. It is also worth noting

that the reference construction was a boiler made in the third class, whose thermal and emission parameters are significantly higher than those in class five. The arithmetic mean of carbon monoxide concentrations is  $92 \text{ mg/m}^3$ , which together with dust pollution at  $37 \text{ mg/m}^3$  and the concentration of nitrogen oxides at  $305 \text{ mg/m}^3$  allowed to meet the assumed criteria. The obtained results are very satisfactory because thanks to the change in the shape and location of the air holes, the result of harmful emissions was improved. Additionally, in favor of the optimized burner, the fact of maintaining the same burner operation settings for both the standard and revised construction is arguable. These results show that the burner design used by boiler manufacturers isn't optimal and can be adjusted to the obtained emissions from the boiler meet the highest requirements. In the case of an improved structure, the amount of dust and carbon monoxide emitted increases with increasing oxygen concentration above 10%. This may indicate that the old type design has oxygen deficiencies in the combustion process both at low and high values. This may be due to the tendency of not participating in a certain amount of air in the combustion process given significantly higher than the burning fuel field. In the case of a new type of construction, an increase in the concentration of dust along with the increasing concentration of oxygen will be associated with an excessive amount of air in the combustion reaction that causes the flame superheat, which leads to the formation of soot. Therefore, when carrying out the combustion process for a revised structure, the amount of combustion air should be carefully selected without creating a significant excess because the furnace, thanks to the orientation of the air planes, is well oxygenated.

## 5. Conclusions

The research problem of the experiment was to show the relationship between the geometric shape and the location of the retort burner's air channels for the emission of harmful substances. The actions taken consisted in determining the concentration of emitted substances from the structure available in individual heating and re-designing individual elements of the old type of burner to lower their level. The actions taken and the methodology chosen have proved to be correct. The researchers' experience as well as the mechanical and thermodynamic approach to the construction resulted in a decrease in the concentration of emitted substances. The results obtained and the actions taken are a prerequisite for further research work in order to further improve the design of retort burners. The empirical and active studies have shown that the structures available on the market are imperfect and can be improved. The main possibilities of correction of burners lie on the side of waste elements that are responsible for thermal and emission properties. In addition, the steps taken and the select-

ed methodology for estimating the position and geometric orientation of the air ducts showed a simple method of refining the mechanical construction of the furnace. All these aspects influenced the receipt of favorable results from the newly modeled structure. The actions and research undertaken were successful. The described test method as well as applied research methods. The conducted research resulted in a positive result and all the objectives were positively implemented.

## REFERENCES

- [1] Ciupek B., R. Urbaniak, J. Bartoszewicz. 2018. „Emisja tlenku węgla i tlenków azotu z kotła małej mocy w zależności od zastosowanego paliwa węglowego”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (3): 90-94.
- [2] Ciupek B. 2018. „Możliwość obniżenia emisji substancji szkodliwych z kotła małej mocy przez współspalanie węgla kamiennego z biomasa niedrzewną”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (7): 257-260.
- [3] Ciupek B. 2018. „Wpływ zawiorowania strugi spalin na obniżenie emisji pyłów oraz podniesienie sprawności ciepłej kotła peletowego”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (8): 333-338.
- [4] Jodkowski M. 2014. “Properties of new formed fuels for iron ore sintering process”. *Hutnik, Wiadomości Hutnicze*, vol. 81, (12): 807-810.
- [5] Krucki A., S. Pilarski. 2014. „Analiza i porównanie wyników badań automatycznych kotłów grzewczych na paliwa stałe wyposażonych w palniki retortowe z wymaganiami normy PN-EN 303-5:2012”. *Instal* (10): 21-29.
- [6] Kubica R., W. Mokrosz, A. Szlęk. 2017. “Improving energy and environmental performance of coal fueled boilers – A new type of centrifugal dust separator with external flue recycle”. *Energy*, vol. (138): 238-248.
- [7] Matuszek K., P. Hrycko. 2013. „Praca kotła c.o. w warunkach laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistej eksploatacji”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 44 (5): 200-205.
- [8] Orszulik E. 2010. „Współspalanie węgla kamiennego z paliwem alternatywnym wytwarzanym na bazie odpadów innych niż niebezpieczne w kotłach energetycznych wyposażonych w palnik retortowy”. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko*, (1): 29-39.
- [9] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze – Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- [10] Slania J., G. Goliński, P. Wilk. 2015. „Awaria palnika retortowego stosowanego w kotłach CO. Analiza przyczyn zniszczenia układu podającego – badania i technologia naprawy”. *Przegląd Spawalniczy* (87): 13-17.
- [11] Urbaniak R., W. Judt, A. Nygard. 2017. „Nowoczesne metody transportu paliw stałych w automatycznych kotłach małej mocy”. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, (18): 646-650.
- [12] Urbaniak R., J. Bartoszewicz, R. Kłosowiak. 2015. “Main Causes of NOx Emissions by Low-Power boilers”, *Polish Journal of Environmental Studies*, (24): 2223-2230.
- [13] Urbaniak R., B. Ciupek, R. Kłosowiak, A. Nygard. 2018. “Analysis of the Possibility of Burning and Co-firing Oats in Automatic Solid Fuel Boilers”. *Chemical Engineering Transactions*, (70): 685-690.
- [14] Wójcik J. 2012. „Influence of fuel quality on boiler work with retort furnace”. *Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie* (32): 126-130.
- [15] Zawistowski J. 2008. „Retortowe kotły węglowe drugiej generacji”. *Rynek Instalacyjny* (4): 65-68.


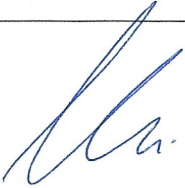
**Ciągła prenumerata gwarancją rzetelnych i najnowszych informacji na temat Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji**

**e-mail: [cieploogrzewwent@sigma-not.pl](mailto:cieploogrzewwent@sigma-not.pl)**

Poznań, 16.06.2020

**Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej**

**Bartosz Ciupek, Rafał Urbaniak, Optimization of the Retort Burner Construction to Reduce Emission of Harmful Substances, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja - 2018, tom 49, nr 12, s. 519-524 DOI: 10.15199/9.2018.12.8**

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Zaprojektowanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie metodyki prowadzenia badań. Opracowanie wniosków końcowych, redakcja tekstu publikacji.	90%	
2.	Rafał Urbaniak	Wsparcie merytoryczne, synteza rezultatów badań, redakcja tekstu publikacji.	10%	

# The influence of geometry of primary air channels in standard retort burners on dust emission

Bartosz Ciupek<sup>1,\*</sup>, Jarosław Bartoszewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chair of Thermal Engineering, Poznan University of Technology, Piotrowo 3, 60-965 Poznan, Poland

**Abstract.** The article presents the analysis of dust emissions from a low power boiler fired with various solid fuels. The boiler, presented for testing, met the emission conditions for boilers made in the third class in accordance with the PN-EN 303-5: 2012 standard. The solid fuel boiler was equipped with two different retort burners with automatic fuel supply. For the test were used a first generation retort burner with a fixed rim and the next were used second generation retort burner provided with a rotary rim. Both constructions differ in the geometrical model of the primary air supply system to the furnace. During the tests, the work of the burners was controlled using a microprocessor temperature controller. During the research, the rotation time of the screw supplying the fuel through the retort to the furnace was changed, as well as the rotational speed of the blast fan impeller responsible for supplying the combustion air. The purpose of the tests was to check whether the boiler will meet the highest environmental class regardless of the technical parameters of the burner and fuel used. The article describes the research methodology and analysis of the results obtained. The effect of the tests carried out is a comparison of average dust emission values depending on the fuel used and the work settings of a given burner. The test results are a prerequisite for further research work in terms of the impact of primary air supply on the emission of harmful substances.

**Keywords:** retort burners, dust emission, heating boilers, air channels

## 1 Introduction

In Poland, during the heating season, drastic deterioration of air quality is noticeable. The main cause of pollution is low emissions due to improperly conducted combustion process in heating solid fuel boilers appliances operating in individual heating. The increasing awareness of the public in the area of improving air quality means that more users choose devices that meet the highest emission standards. In many places, autonomous regulations aimed at combating smog have also been introduced. Another element related to the high

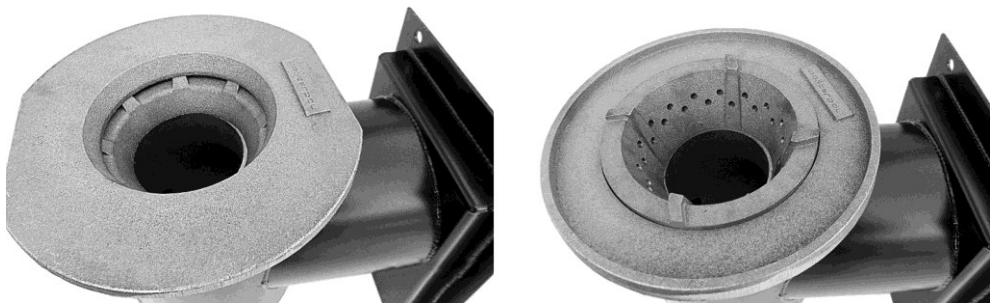
---

\* Corresponding author: [bartosz.ciupek@put.poznan.pl](mailto:bartosz.ciupek@put.poznan.pl)

Reviewers: *Maciej Bodnicki, Jan Vavro Jr.*

emission of harmful substances during the heating season is the incineration of waste or poor quality fuel. Waste incineration and the use of cheap and bad quality fuels is a measure of the impoverishment of society. Dusts suspended in the air are dangerous to health due to their reactivity with other toxins. Breathing with dusty air has a negative effect on the upper respiratory tract and circulatory system. The people with frequent contact with dusty air can develop serious respiratory diseases, including cancer. The high dustiness of air during the heating period is a serious heating problem in the 21st century. There are many ways to reduce the amount of dust emitted. The basic ones are: the use of high quality fuel, the change of the burner to a low emission construction. From the burner designs offered on the market, we distinguish old and new type burners with an improved air supply system. The latest research issues are guided many times towards the use of fuels different from conventional fuels [1, 2, 3]. Natural gas and gases generated in the refining of crude oil are no longer the only ones that are used in the industry and the municipal and household sector. The above mentioned works are examples taken from the most renowned journals dealing with fuel research. Solid fuels, coal and lignite as well renewable fuels used in boilers as fuels are also the subject of research works of an increasing number of scientific and industrial workers. The growing requirements regarding the operation of solid fuel boilers lead to analyzes of the long term operation of boilers under variable load conditions [4] and to an increasing extent reach for numerical methods supporting the design of devices and the combustion process [5, 6]

In the experiment, two retort burners were used: first generation and second generation. Both burners are presented in figure 1. The first generation burners are the dominant structures in Polish heating. They are characterized by simple construction but also high level of emitted harmful substances. Second generation burners have been introduced for use recently. They are equipped with a rotating air delivery rim. They are characterized by a lower level of emitted harmful substances relative to the first generation retort. Second generation burners are already equipped with targeted air openings, however, the angle of air flow for them is 0 degrees which does not create a disturbed stream but only reproduces the air supply system from the first generation structure. In addition, they have a reduced positioning of the air holes. More information on the operation of retort burners can be found in publications [7, 8, 9, 10]. For both constructions, a structural analysis was carried out and the concentrations of emitted dusts were measured. The next stage of the research was fixing the overlay of air channel on the upper part of the burner and finding the optimal angle of the air outlet to the firing layer so as to obtain a reversible air stream. This operation was aimed at obtaining a uniform flame which would cause burning of dust escaping from the burner. The last stage was to rebuild the air rim for the old structure by applying air holes on its circumference with the predetermined optimal angle of air outflow. The final stage was to perform tests of the dust concentration in the flue gases for the improved structure.



**Fig. 1.** An example of a first generation retort burner (left side) and a second generation retort burner (right side)

## **2 Aim**

The purpose of the conducted research was to check whether the shape and geometry of the position of the air channels in the retort burner affects the concentration of emitted dusts and whether it is possible to reduce the emission of dust from the first generation burner by redesign the air rim to create a structure of airstream withdrawn.

## **3 Methods**

Two retort burners were used to perform the experimental research: the first generation equipped with a fixed rim and the second generation equipped with a rotating rim. For both constructions, a structure analysis was carried out and then the concentrations of dust emitted by them were measured. The next step was to change the rim of the first generation of the burner to reduce dust emissions. To this end, an overlay of air channel was used to analyze the speed of the outflowing air. The purpose of this part was to find the angle of the air holes in the standard rim that the air supplied to the layer creates a structure of airstream withdrawn. The individual stages of research and the methods used in them are presented below.

### **3.1 Characteristics and test methods of the first generation retort burner**

The first generation retort used for the study was a Pancerpól burner model PPS 25 kW Standard. This burner consists of a cast iron rim placed in a cast iron plate, the whole is placed on a cast iron retort.

The rim used in the burner consists of eight air holes whose geometry is semicircular in shape and the cross-section is trapezoidal. The supply of fuel to the air rim takes place through a cast iron knee set at an angle of 90°. The fuel outlet opening in the rim widens at an angle of approximately 30° in the direction of fuel out. The shaped hearth allows to slow the flow of fuel in the furnace. The task of the rim is the distribution of air supplied by the air chamber to the burning layer. The combustion process takes place on the surface of the plate. In order to test the dust emission level from the burner, it was placed in a Heiztechnik Q Eko 15 heating boiler. This boiler is equipped with an entrance dedicated to burners manufactured by Pancerpól. The view of the heating boiler with the test stand is presented in figure 2. The location of the air channels in the top part of the rim causes hypoxia of the firing layer. From the tests and observations carried out, the air dosing system is imprecise because at the moment of fuel combustion below the level of openings some air does not participate in the combustion process and escapes directly to the convection parts of the boiler and then to the chimney. In addition, an excessive amount of air that does not participate in the combustion process contributes to raising some of the dust from the surface of the plate, which also affects the increased emission of this substance. These situations contribute to the hypoxia of the firing layer and increase of the level of harmful substances emitted. The first generation burner was used in the first phase of research to determine the level of dust output from the old type construction.



**Fig. 2.** View of the heating boiler with the test stand

### **3.2 Characteristics and test methods of the second generation retort burner**

In the case of second generation retort burner studies, was used a Pancerpol PPSM 25 kW Duo burner. This burner, in comparison to the first generation burner, differs in the air rim used in it.

In the case of the second generation burner, the rim used enables rotation of the burning layer, which prevents sintering of the slag. Additionally, the longitudinal air holes were replaced with two rows of oval holes with a diameter of 6 mm. In addition, the location of the air supply holes has been changed, reducing their location to half the height of the rim. As in the case of the first generation retort, the air rim has a divergent shape with an inclination angle of approximately 30°. The dust emission level tests were also performed on the Heiztechnik Q Eko 15 boiler. In the case of the second generation of the burner, the level of emitted dust is significantly lower than in the case of the first generation. This is due to the multiplication of the points supplying the combustion air and the lower positioning of the holes, which allows better oxygenation of the burning layer. The observation of the geometric model of the second generation burner and the emission results obtained from it, allowed for further steps to transform the first generation rim structure so as to obtain similarly satisfactory emission results. The design of the air rim from the second generation hearth served as an inspiration to redesign the first generation air rim, using the concept of oval openings to further reduce the emission of harmful substances, efforts to orient the air holes. The second generation burner was used in the next phase of research to determine the level of dust emission from a new type of construction.

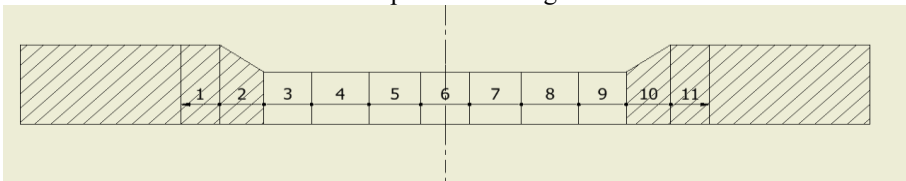
### 3.3 Characteristics and test methods of the first generation retort burner with the use of a steering overlay

In order to improve the design of the first generation burner, an overlay with a notches in the shape of the blades was used. The use of the steering plate made it possible to examine the air outflow profile from the burner without overlay and with overlay. The tests were carried out for the burner without overlay and with overlay. The tests without the overlay were intended to examine the normal profile of the velocity of the outgoing air from the rim. In the case of tests with a overlay, an optimal angle of the outgoing air was created to reversible air flow. The overlay was made of 0.5 mm thick steel sheet with eight notches in the shape of the letter L. The view of the overlay used is shown in figure 3.



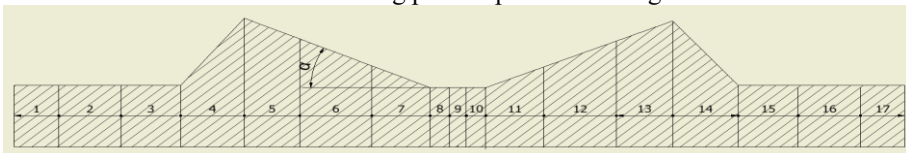
**Fig. 3.** View of the overlay used in tests

The base of the steering wheel was 30 mm long and the longer arm 50 mm. Steering plate was fixed permanently to the cast iron fireplace plate. Steering flaps were folded from  $\alpha = 20^\circ$  upwards every  $10^\circ$ . Air distribution tests were made across the length of the hearth plate. The final stage of the research was to achieve the optimal angle of outflow causing the maximum return of the air stream. The distribution of the outgoing air was measured by a micromanometer with a pitot probe for the fire plate divided into 11 sections. The method of division the hearth without a sheet is presented in figure 4.



**Fig. 4.** View of the division of standard retort rim used in tests

For measurements with the steering overlay mounted, the cross section of the burner was divided into 17 sections in which the measurements were made. The method of division the burner with the used steering plate is presented in figure 5.



**Fig. 5.** View of the division of overlay used in tests

### 3.4 Other methods used in tests

The test methods used for testing are described in the standard PN-EN 303-5:2012. The lignite fuel was used to the tests. Fuel was stabilized before the tests under the same laboratory conditions. The obtained test results were compared with the currently applicable regulations regarding the emission of dust from boilers. According to the



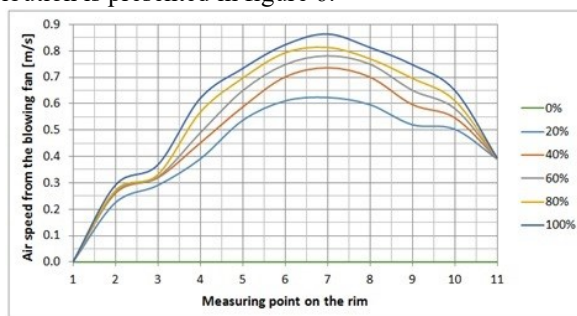
standard, the emission of dust from boilers with automatic feeding of fuels made in the fifth class should not be greater than  $40 \text{ mg/m}^3$  with 10% oxygen content in the exhaust gas. The studies assume that the arithmetic mean of dust emissions from the entire test cycle should not exceed this value. In each test cycle, constant and uniform parameters of boiler operation were maintained, while during the measurements the boiler operation settings were not interfered with. Extended information on exploitation and testing of boilers can be found in [11, 12]. The flow temperature was kept on average between  $75^\circ\text{C}$  to  $80^\circ\text{C}$  and on the return on average between  $60^\circ\text{C}$  to  $65^\circ\text{C}$ ; the temperature difference was around  $15^\circ\text{C}$ . During the research, the same environmental conditions prevailed. The burner operation was controlled by means of a microprocessor control system. This solution enabled a smooth change of the fuel supply and air settings in the burner, so as to obtain the same operating parameters in each test. A gravimetric dust meter was used to measure selected emission parameters of exhaust gases. The gas intake lance was mounted in the measuring chimney, and the selected exhaust parameters unrelated to the dust measurement were measured and recorded using the appropriate recording program. The emission value in the test cycle was determined as the arithmetic mean of individual measurements throughout the cycle. Each research cycle lasted about 2 hours. The parameters collected were converted into values in  $\text{mg/m}^3$  at 10%  $\text{O}_2$  content in the flue gases, which is in line with the PN-EN 303-5:2012 standard.

The research laboratory was equipped with a system of heat exchangers used to extract the heat generated during the tests. In the probes placed in the chimney, thermocouples for measuring the exhaust temperature were installed. The final exhaust temperature was determined as the arithmetic mean of five measuring thermocouples. The thermal power of the boiler was determined by means of a system consisting of four heat exchangers connected in series, the rated heat output of each exchanger was 50 kW. In addition, an electromagnetic flow meter and thermocouples were used to measure the temperature of water on the supply and return from the boiler. In addition to the estimation of the thermal power delivered by the heating water, the mass flow of the water leaving the exchangers was measured using a scale. During each of the research cycles, after obtaining the required thermal parameters, the device operation was stabilized and measurements and analysis of dust pollution were made.

## 4 Results

### 4.1 Test results of the air speed profile

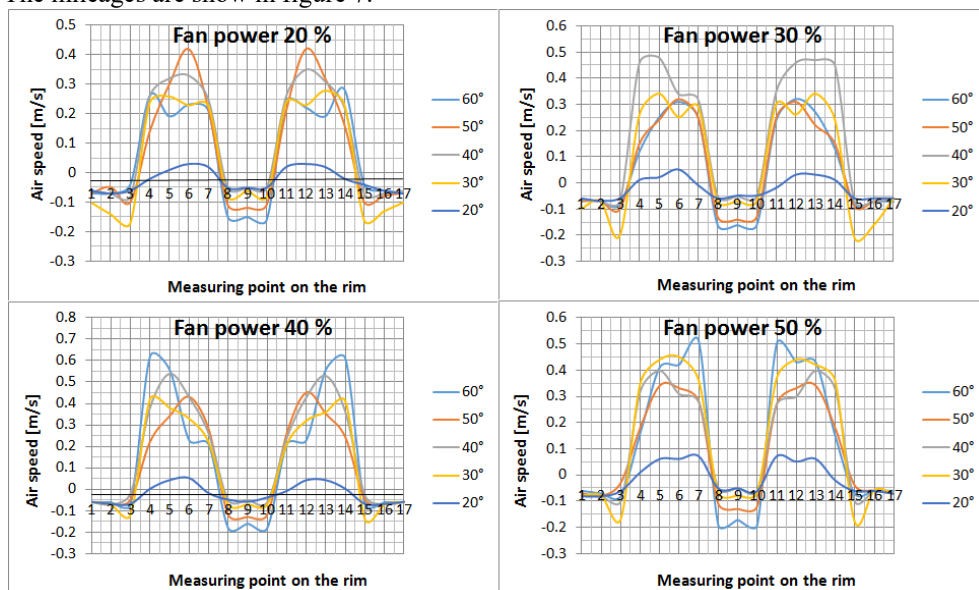
The tests of the air speed profile for the burner in the producer's version have been carried out for the rotational speed of the blast fan rotor in the range from 0-100% with a 20% step. The resulting distribution is presented in figure 6.



**Fig. 6.** View of the air velocity relative to the rotational speed of the fan

From the obtained results it can be seen that the highest air velocity is obtained for 100% of the fan setting and gives the speed of  $c = 0.85$  m/s. In addition, the peak of the characteristic is shifted from point number 6 to point number 7 closer to the right side. Between points 1 and 4 you can see lower velocities of air outflow in relation to their symmetry for points 8 to 11. The reason for air downturn may be the retort knee located at this point, which causes the air flow to stop. This study showed that the burner construction itself is inaccurate and some of the layer above the retort knee may have air shortages due to the reduced air flow velocity.

Tests for the burner with the steering pad used were carried out for steering angle angles from  $\alpha = 20^\circ$  to  $60^\circ$  every  $10^\circ$  and changing the rotor speed from 20% to 50% every 10%. The mileages are show in figure 7.



**Fig. 7.** View on the course of dynamic pressure at a given measuring point in relation to the deflection angle of the steering flaps in the overlay

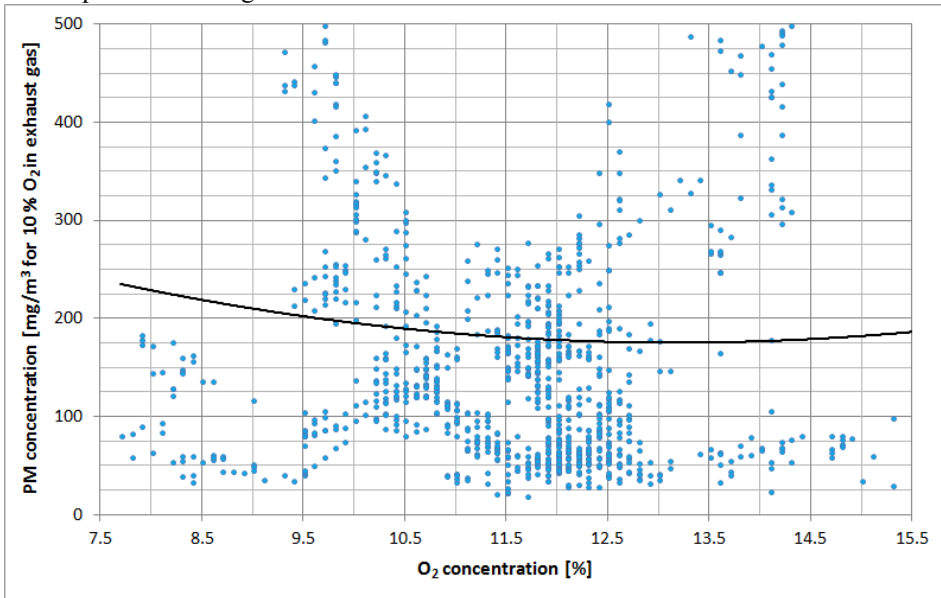
From the obtained characteristics, we can see that regardless of the rotor speed level, the largest withdrawal of the air stream was obtained for an air outlet angle of  $60^\circ$ . Therefore, holes were made in the corrected rim at this angle. It has been assumed that the diameter of the holes will be the same as in the second generation burner, it will be around 6 mm. Vertical orientation of air channels are  $60^\circ$  and the additional horizontal deviation is  $30^\circ$ . The angle of horizontal deviation resulted from the complement of the angle of the side of the steering wheel to the base forming the air outlet. Collected data from the used steering wheel were to reproduce the obtained results from the research carried out with the steering overlay as much as possible.

#### 4.2 The results of the tests of the concentration of dust in the exhaust

During the tests of individual constructions, it was tried to maintain the same thermal conditions of the burner as well as the boiler and use the same air supply settings (rotational speed of the fan) and the amount of fuel fed to the boiler.

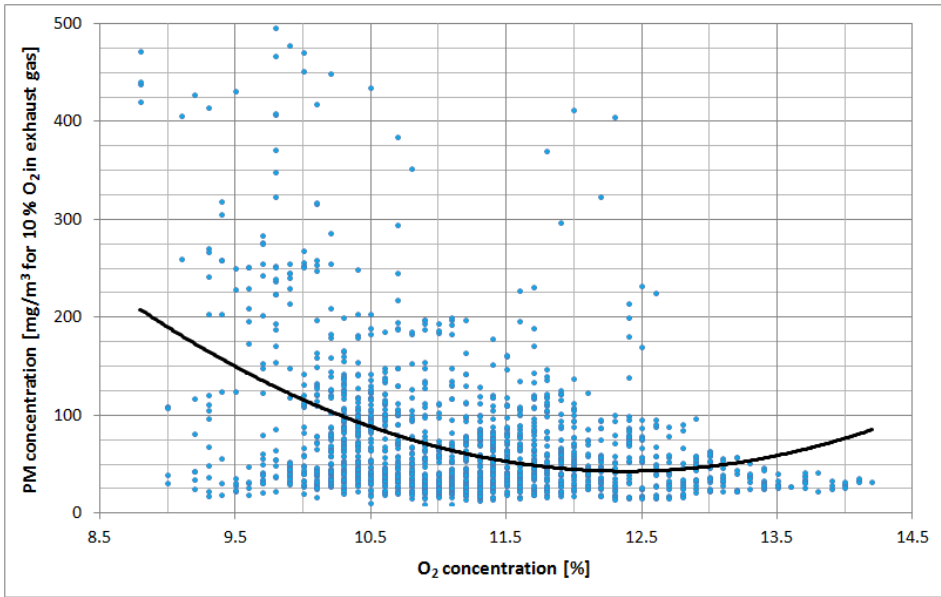
The first element subjected to dust emission tests was the first generation retort burner without structural changes. The course of emission of harmful substances that was obtained can be treated as input data regarding the amount of dust emitted. The boiler was subjected

to four test sessions of 30 minutes each, which gives a total of 2 hours measurements. From the obtained results a common course of emitted dusts was carried out to the measured oxygen level in the flue gas. The arithmetic mean of dust pollution was  $199 \text{ mg/m}^3$ . The obtained result significantly differs from the assumptions of the standard for boilers made in the fifth class. The obtained average exceeds the standard's assumption almost five times. Such a high emission of harmful substances shows that the first generation burners used in boilers do not meet the requirements of low emission constructions in any aspect and they should be subjected to a comprehensive verification of construction parameters and steps should be taken to modernize them. The results obtained also confirmed the correctness of the measures taken to redevelop the burner part. The obtained course for the first generation burner is presented in Figure 8.



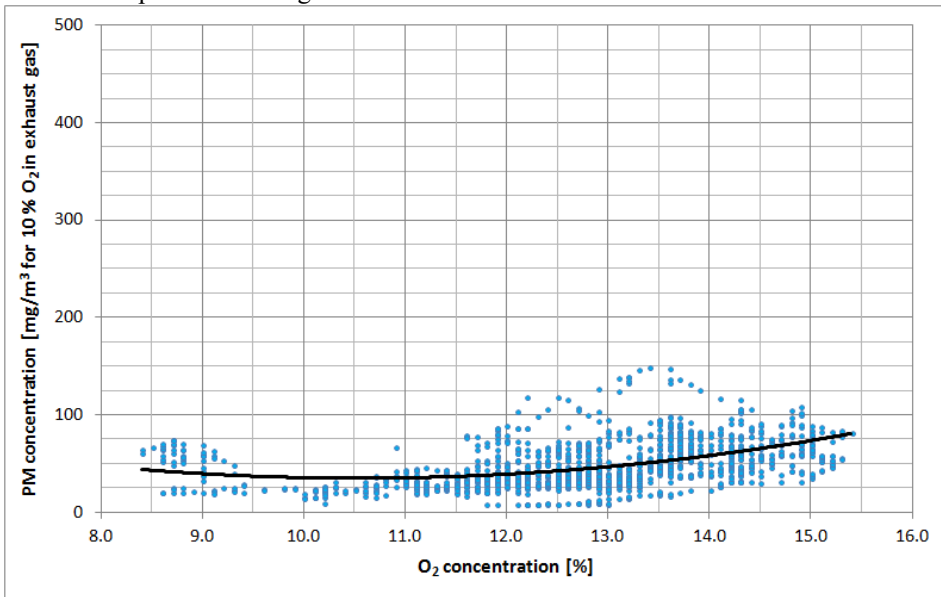
**Fig. 8.** The course of dust pollution in relation to the oxygen content for first generation retort burner with old rim

Another tested construction was a second generation retort burner. The entire research cycle as well as the methodology of the conducted research was identical to that of the first generation burner. The application of convergent research methods allowed to exclude the influence of external factors on the obtained results. Similar settings of the burner operation were also used to obtain similar operating conditions. From the obtained results and the literature study [13]. We can see that the burner equipped with a rotating rim has significantly better operating parameters relative to the first generation burner. The arithmetic mean of the concentration of emitted dust is  $74 \text{ mg/m}^3$ . The obtained result confirmed the correctness of the steps taken to redesign the first generation burner. It has been shown that the use of cylindrical holes gives better burner performance relative to trapezoidal hemispherical holes. The obtained course for the second generation burner is presented in Figure 9.



**Fig. 9.** The course of dust pollution in relation to the oxygen content for second generation retort burner

The last stage of the research was to conduct a flue gas analysis for the rim with improved construction. The old air holes were blinded with high temperature silicone. As a result, the air was sent to the burner only through previously prepared openings. As before, 4 measurement sessions were carried out of 30 minutes each, and the results obtained were presented in Figure 10.



**Fig. 10.** The course of dust pollution in relation to the oxygen content for first generation retort burner with new rim

The arithmetic mean of the dust concentration tests in combustion gases is  $47 \text{ mg/m}^3$ . This result is very satisfactory because thanks to the shape change and the location of the

air channels, we managed to improve the emission result more than 4 times while maintaining uniform settings of the burner operation. This result shows that the design offered by the manufacturer is incorrect and that it can be adjusted so that obtained emissions from the boiler meet the highest standards. In addition, we managed to obtain a lower dust concentration compared to the second generation of burner, which gives the premise to improve the structure of burners in terms of thermal and emission.

From the obtained results, we see significant dust emission for both the oxygen level below 10% and above for first generation burner. In the case of an improved structure, the amount of dust emitted increases with increasing oxygen concentration above 10%. This may indicate that the old type design has oxygen deficiencies in both low values and high oxygen contents in the exhaust. This may result from the escape of a certain amount of air that is not managed in the combustion process. In the case of a new type of construction, an increase in the concentration of dusts with increasing oxygen concentration will be associated with an excessive amount of air in the combustion reaction which will cause sub cooling of the flame ends and the formation of soot. While conducting the combustion process for a revised structure, the amount of combustion air should be carefully selected without creating a significant excess because the layer is well mixed with the air, which results in good layer oxygenation.

## 5 Conclusions

The research problem of the experiment was to show the relationship between the geometric shape and the location of the retort burner's air channels on the emission of harmful substances in the form of dust. The actions taken consisted in determining the concentration of emitted dust from the structures available in individual heating and re-designing individual elements of the old type of burner so as to lower their level. The actions taken and the methodology chosen have proved to be correct. The researchers experience as well as the mechanical and thermodynamic approach to the construction resulted in a lower concentration of emitted dust substances. The results obtained and the actions taken are a prerequisite for further research to further refine the design. The empirical and active studies have shown that the structures available on the market are imperfect and can be improved. The main possibilities of correction of burners lie on the side of the structure of gangle elements that are responsible for thermal and emission properties. In addition, the steps taken and the selected methodology for estimating the position and geometric orientation of the air ducts showed a simple method of redesign the mechanical construction of the burner. All these aspects influenced the receipt of favorable results from the newly modeled structure. Unfortunately, from the tests of the improved design of the burner, it was not possible to obtain emissions at the level of 40 mg/m<sup>3</sup> of dust pollination, but the obtained result at the level of 47 mg/m<sup>3</sup> was close to the requirements. Taking into account the measurement error of the apparatus declared by the manufacturer at the level of about 10 mg/m<sup>3</sup>, it can be assumed that the construction at very accurate measurements and additionally adjusted for tests would have a mean result significantly lower than the requirements of the standard. This can be proved by dust emission results obtained on the corrected burner from 8-40 mg/m<sup>3</sup> about 65% of the results. The undertaken activities and research proved to be accurate as well as the applied research methods. The conducted research resulted in a positive result and all the objectives were positively implemented.



## References

1. D. Szewczyk, R. Ślefarski, R. Jankowski, *Analysis of the combustion process of syngas fuels containing high hydrocarbons and nitrogen compounds in Zonal Volumetric Combustion technology*. Energy **121**, 716-725 (2017)
2. D. Szewczyk, R. Jankowski, R. Ślefarski, J. Chmielowski, *Experimental study of the combustion process of gaseous fuels containing nitrogen compounds with the use of new, low-emission Zonal Volumetric Combustion technology*. Energy **92**, 3-12 (2015)
3. J. Jójka, R. Ślefarski, *Dimensionally reduced modeling of nitric oxide formation for premixed methane-air flames with ammonia content*. Fuel **217**, 98-105 (2018)
4. R. Urbaniak, J. Bartoszewicz, R. Kłosowiak, *Main Causes of NOx Emissions by Low-Power boilers*. Polish Journal of Environmental Studies **24**, 2223-2230 (2015)
5. R. Urbaniak, J. Bartoszewicz, W. Judt, *Analysis of the possibilities of application of numerical methods in the improvement of the operating efficiency of low-power boilers*. Heat Transfer Research **49**, 675-683 (2018)
6. J. Bartoszewicz, L. Bogusławski, *Numerical analysis of the steam flow field in shell and tube heat exchanger*. Archives of Thermodynamics **37**, no.2, 107-120 (2016)
7. K. Matuszek, P. Hrycko, *Praca kotła c.o. w warunkach laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistej eksploatacji*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja T.44, **5**, 200-205 (2013)
8. E. Orszulik, *Współspalanie węgla kamiennego z paliwem alternatywnym wytwarzanym na bazie odpadów innych niż niebezpieczne w kotłach energetycznych wyposażonych w palnik retortowy*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko **1**, 29-39 (2010)
9. J. Słania, G. Goliński, P. Wilk, *Awaria palnika retortowego stosowanego w kotłach CO. Analiza przyczyn zniszczenia układu podającego – badania i technologia naprawy*. Przegląd Spawalniczy T. 87, **6**, 13-17 (2015)
10. R. Urbaniak, W. Judt, A. Nygard, *Nowoczesne metody transportu paliw stałych w automatycznych kotłach małej mocy*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe T.18, **12**, 646-650 (2017)
11. A. Krucki, S. Pilarski, *Analiza i porównanie wyników badań automatycznych kotłów grzewczych na paliwa stałe wyposażonych w palniki retortowe z wymaganiami normy PN-EN 303-5:2012*. Instal **10**, 21-29 (2014)
12. J. Wójcik, *Influence of fuel quality on boiler work with retort furnace*. Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie **32**, 126-130 (2012)
13. J. Zawistowski, *Retortowe kotły węglowe drugiej generacji*. Rynek Instalacyjny **4**, 65-68 (2008)

Poznań, 16.06.2020

### Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej

**Bartosz Ciupek**, Jarosław Bartoszewicz, The influence of geometry of primary air channels in standard retort burners on dust emission, MATEC Web of Conferences - 2019, vol. 254, s. 04009-1 – 04009-11, DOI: 10.1051/mateconf/201925404009

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Zaprojektowanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie metodyki prowadzenia badań. Opracowanie wniosków końcowych, redakcja tekstu publikacji.	90%	
2.	Jarosław Bartoszewicz	Wsparcie merytoryczne, synteza rezultatów badań, redakcja tekstu publikacji.	10%	

# Effect of fineness and increased humidity of carbonaceous fuels on the chemical composition of exhaust gases

## Wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny spalin

DOI: 10.15199/62.2019.8.15

**Hard coal and lignite (grain size 5–25 mm) were grinded up to 1 mm or modified by addn. of 10% moisture and combusted. The moisture addn. to both types of fuel resulted in a decreasing  $\text{NO}_x$  content in the exhaust gas. All lignite samples showed a reduced CO content in the combustion gases.**

Zbadano wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na poziom emisji substancji szkodliwych z procesu ich spalania w kotle grzewczym. Opierając się na wynikach pomiarów składu chemicznego spalin, można wykryć spalanie paliwa o niskiej kaloryczności lub zawilgoconego. Do badań wybrano węgiel kamienny i brunatny. Jako wyznacznik detekcji spalania paliw niskojakościowych wytypowano pomiar stężeń masowych CO i  $\text{NO}_x$  w spalinach. Do badań przygotowano dla każdego rodzaju paliwa trzy próbki w postaci węgla niemodyfikowanego, drobno rozdrobnionego węgla oraz paliwa o podwyższonej wilgotności o 10%. Ponadto zmierzono temperaturę spalin, współczynnik nadmiaru powietrza i określono sprawność cieplną.

Zagadnienie jakości procesu spalania paliw stałych w kotłach grzewczych jest coraz częściej poruszane w dyskusji naukowej<sup>1)</sup>. Głównym

źródłem ciepła stosowanym w ogrzewnictwie krajowym są kotły spalające paliwa stałe. Jakość procesu spalania w kotłach małej mocy wynika bezpośrednio z parametrów konstrukcyjnych i termodynamicznych kotła oraz parametrów technicznych wykorzystanego paliwa<sup>2-3)</sup>. Z prowadzonych badań widać wpływ parametrów technicznych paliw na zmienność stężeń masowych CO i  $\text{NO}_x$  emitowanych w trakcie ich spalania, co umożliwia wykorzystanie tych informacji do wykrywania spalania paliw o niskiej jakości<sup>4-7)</sup>. Ponadto współspalanie paliw węglowych z biomasą drzewną, jak i niedrzewną, warunkuje zmianę w stężeniach masowych emitowanych substancji szkodliwych, co pozwala na analogiczne podejście względem wykrywania spalania paliw niskojakościowych<sup>8-12)</sup>. Wcześniejsze próby badawcze obejmowały najczęściej analizę wpływu konstrukcji kotła i sposobu podawania paliwa<sup>13, 14)</sup>. Do badań wybrano paliwa o parametrach technicznych opisanych wartością opalową ( $H_v$ ), sortymentem i zawartością wilgoci ( $W^p$ ). Analizowano dwa paliwa węglowe w postaci węgla kamiennego i brunatnego jako najczęściej użytkowane w energetyce zawodowej i komunalnej.

### Część doświadczalna

#### Materiały

W badaniach zastosowano dwa rodzaje paliw węglowych: węgiel kamienny i węgiel brunatny w sortymencie groszek (5–25 mm). Oba paliwa badano przy zawartości wilgoci całkowitej dla stanu roboczego i zwiększonego o 10%. Parametry techniczne paliw i ich oznaczenia w tekście zamieszczono w tabeli 1.



Mgr inż. Bartosz CIUPEK w roku 2017 ukończył studia na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Jest doktorem w Katedrze Techniki Ciepłej tej uczelni. Specjalność – wymiana ciepła, procesy spalania.

\* Autor do korespondencji:

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 665-22-14, GSM: +48 605-916-099, e-mail: bartosz.ciupek@put.poznan.pl



Dr Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ w roku 1996 ukończyła studia na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jest adiunktem w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. Specjalność – fizykochemia gazów i cieczy, chemia żywności.



Table 1. Technical parameters of fuels used in tests

Tabela 1. Parametry techniczne paliw użytych w badaniach

Typ węgla	Wariant	Wartość opałowa, MJ/kg	Wilgotność, % obj.	Sortyment, mm
Węgiel kamienny	niemodyfikowany	24,4	14,0	5–25
	rozdrobniony			1–5
	+ 10% wilgoci		24,0	5–25
Węgiel brunatny	niemodyfikowany	18,1	26,0	5–25
	rozdrobniony			1–5
	+ 10% wilgoci		36,0	5–25

## Aparatura

Do przeprowadzenia badań wykorzystano kocioł na paliwo stałe Vulcanus Plus o mocy 18 kW, spełniający warunki techniczne dla kotłów w klasie 5. Podczas badań moc cieplną kotła utrzymywano na poziomie mocy maksymalnej. Moc cieplna kotła podczas testów oscylowała  $\pm 1,5$  kW względem mocy nominalnej. Sprawność cieplna badanego obiektu podczas pracy z mocą nominalną przy użyciu paliwa wysokokalorycznego wynosiła średnio 94,5%. Zawartość  $O_2$  w spalinach mierzono analizatorem spalin BCA-01. Jego zakres pomiarowy wynosił od 0 do +25% objętości tlenu, a błąd pomiarowy  $\pm 0,8\%$ . Zawartość CO i  $NO_x$  w spalinach mierzono analizatorem spalin Testo 350 XL, który był wyposażony w fotochemiczne cele pomiarowe. Czas analizy ustalono jako jedno próbkowanie na sekundę. To ustawienie wynikało z możliwości wystąpienia chwilowych wysokich stężeń CO ( $> 10\ 000$  ppm). Dokładność pomiaru CO wynosiła  $\pm 10\%$ , a  $NO_x \pm 8\%$ . Do pomiaru temperatur wykorzystano termopary typu K (NiCr-Ni) o zakresie pomiarowym od  $-200^\circ\text{C}$  do  $+1370^\circ\text{C}$  i błędzie pomiarowym  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Strata ciepła w instalacji grzewczej wynosiła ok.  $\pm 2,5\%$ . Za odbiór wytworzonego ciepła odpowiedzialny był układ płytowych wymienników ciepła o sumarycznej mocy 50 kW.

## Metodyka badań

Rejestracja danych dotyczących pracy cieplnej urządzenia i emisji substancji szkodliwych odbywała się na stanowisku pomiarowym wyposażonym w karty pomiarowe typu ADAMview. Badania podzielono na dwa cykle. W pierwszym cyklu wykorzystano węgiel kamienny, mierzono zawartość CO,  $NO_x$ ,  $O_2$  oraz temperaturę spalin. Dodatkowo obliczano współczynnik nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) i sprawność cieplną kotła ( $\eta$ ). Kolejnym etapem pierwszego cyklu było powtórzenie tych samych procedur badawczych dla paliwa rozdrobnionego, jak również z dodaną wilgocią. W drugim cyklu badań stosowano węgiel brunatny w trzech analogicznych wariantach.

## Wyniki i ich omówienie

Wyniki badań dla pierwszego cyklu zaprezentowano w tabeli 2. Otrzymane emisje w funkcji czasu dla CO i  $NO_x$  zaprezentowano na rys. 1 i 2. Emisja CO ze spalania rozdrobnionego węgla kamiennego była dwukrotnie wyższa niż emisja CO ze spalania paliwa niemodyfikowanego. Emisja CO dla nawilżonego paliwa wzrosła trzykrotnie w stosunku do emisji CO dla niemodyfikowanego paliwa. Średnie stężenie masowe  $NO_x$  podczas spalania rozdrobnionego węgla było wyższe o  $124\text{ mg/m}^3$  w porównaniu ze spalaniem węgla niemodyfikowanego. Temperatura spalin  $T_s$  ze spalania węgla z dodatkiem wilgoci zmniejszyła się o  $34^\circ\text{C}$  w porównaniu z temperaturą spalin dla niemodyfikowanego paliwa.

Wyniki badań dla drugiego cyklu zaprezentowano w tabeli 3. Otrzymane przebiegi emisji w czasie dla CO i  $NO_x$  zaprezentowano na rys. 3 i 4. Najwyższe średnie stężenie tlenu węgla zarejestro-

Table 2. Results for the first cycle test

Tabela 2. Wyniki dla pierwszego cyklu badań

Typ paliwa	Oznaczenie	$O_2$ , %	CO, $\text{mg/m}^3$	$NO_x$ , $\text{mg/m}^3$	$T_s$ , $^\circ\text{C}$	$\lambda$	$\eta$ , %
Niemodyfikowany	paliwo 1	$11,37 \pm 0,06$	$518,28 \pm 2,59$	$336,23 \pm 1,68$	$230 \pm 1$	2,20	$73,93 \pm 0,18$
Rozdrobniony	paliwo 2	$12,12 \pm 0,06$	$1011,00 \pm 5,06$	$460,56 \pm 2,30$	$207 \pm 1$	2,39	$73,10 \pm 0,17$
+ 10% wilgoci	paliwo 3	$14,74 \pm 0,07$	$2037,63 \pm 7,13$	$261,66 \pm 1,31$	$196 \pm 1$	3,52	$64,62 \pm 0,13$

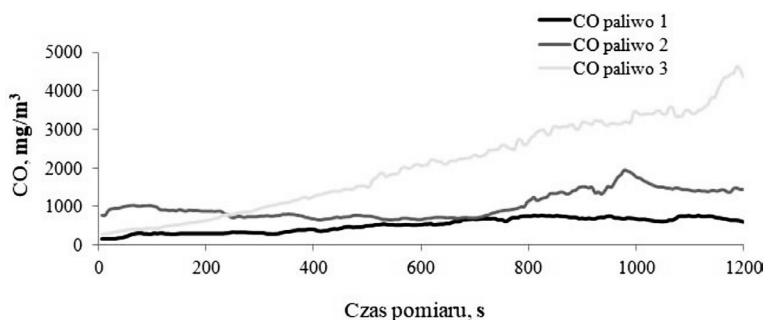


Fig. 1. The course of CO emissions for black coal

Rys. 1. Przebieg emisji CO dla węgla kamiennego

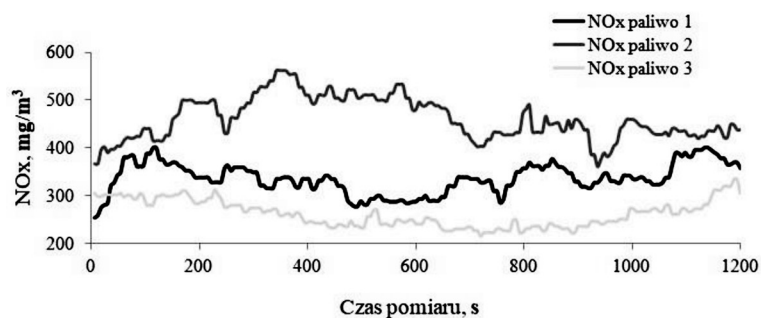


Fig. 2. The course of  $NO_x$  emissions for black coal

Rys. 2. Przebieg emisji  $NO_x$  dla węgla kamiennego

wano dla węgla brunatnego niemodyfikowanego. Rozdrobnienie spowodowało zmniejszenie zawartości CO w spalinach o  $500\text{ mg/m}^3$ . Ponadto, nawilżenie paliwa do wilgotności ok. 36% spowodowało zmniejszenie ilości CO względem niemodyfikowanej wersji o  $684\text{ mg/m}^3$ . Dodanie wilgoci do paliwa spowodowało zmniejszenie zawartości emitowanych  $NO_x$  średnio o  $146\text{ mg/m}^3$  w stosunku do paliwa niemodyfikowanego. Ponadto, spalanie rozdrobnionego paliwa spowodowało wzrost emitowanych tlenków azotu o  $44\text{ mg/m}^3$



Dr hab. inż. Rafał URBANIAK w roku 2006 ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Jest adiunktem w Katedrze Techniki Ciepłej tej uczelni. Specjalność – energetyka, procesy spalania.

Table 3. Results for the second cycle test

Tabela 3. Wyniki dla drugiego cyklu badań

Typ paliwa	Oznaczenie	O <sub>2</sub> , %	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	T <sub>s</sub> , °C	λ	η, %
Niemodyfikowany	paliwo 4	12,87 ± 0,06	1375,67 ± 6,88	519,33 ± 2,60	243 ± 1	2,70	66,25 ± 0,13
Rozdrobniony	paliwo 5	12,24 ± 0,06	874,94 ± 1,98	563,32 ± 1,63	261 ± 1	2,55	65,35 ± 0,12
+ 10% wilgoci	paliwo 6	11,27 ± 0,06	691,31 ± 1,68	373,26 ± 1,47	179 ± 1	2,21	57,73 ± 0,14

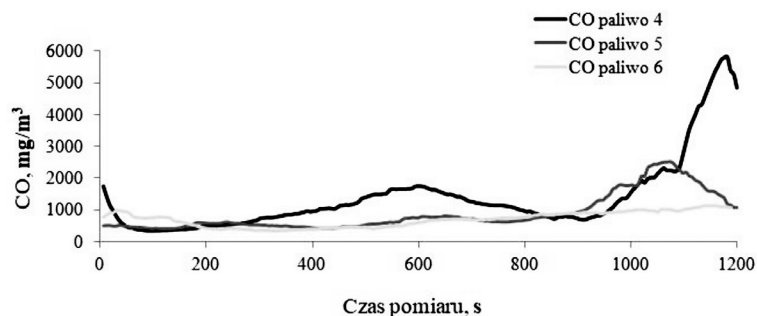


Fig. 3. The course of CO emissions for lignite

Rys. 3. Przebieg emisji CO dla węgla brunatnego

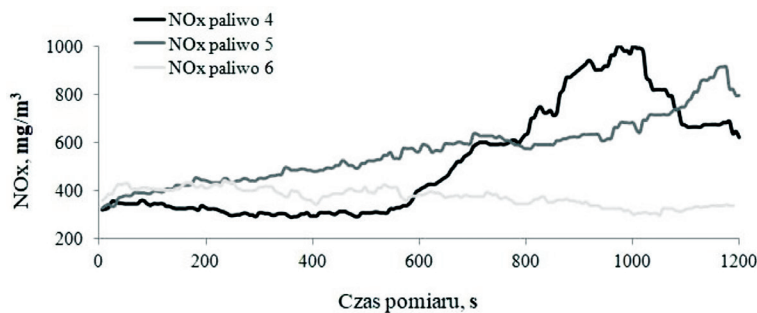


Fig. 4. The course of NO<sub>x</sub> emissions for lignite

Rys. 4. Przebieg emisji NO<sub>x</sub> dla węgla brunatnego

oraz obniżenie  $T_s$  o 64°C. Zastosowanie paliwa o niższej wartości opałowej (ok. 6 MJ/kg) spowodowało zmniejszenie mocy cieplnej kotła w stosunku do węgla kamiennego o 8%. Przy spalaniu węgla kamiennego niemodyfikowanego średnia temperatura w komorze spalania wynosiła ok. 890°C, a dla węgla brunatnego niemodyfikowanego wynosiła ok. 755°C.

## Podsumowanie

Przeprowadzono badania nad wpływem rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny powstałych w procesie ich spalania spalin. Na podstawie otrzymanych wyników widać odwrotność w przebiegach stężeń masowych tlenu węgla(II), a w przypadku NO<sub>x</sub> widać tożsamość uzyskanych wyników. Analogiczne przebiegi zmian temperatury spalin i sprawności cieplnej widać dla procesu spalania paliw niemodyfikowanych i ze zwiększoną wilgotnością. Prowadzenie procesu spalania węgla kamiennego w wysokiej temperaturze panującej w komorze spalania i dodanie znacznej ilości wilgoci zintensyfikowało powstawanie tlenu węgla. Zwiększenie zawartości wilgoci w obu paliwach obniżyło temperaturę w komorze spalania, co wiązało się ze spadkiem temperatury spalin, a tym samym sprawności cieplnej urządzenia.

Praca wykonana w ramach projektu naukowego nr POIR.04.01.04-00-0135/16 „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwo stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej”, finansowanego przez NCBIR.

Otrzymano: 29-05-2019

## LITERATURA

- [1] J. Hehlmann, W. Szeja, M. Jodkowski, *Roczn. Ochr. Środ.* 2011, **13**, 891.
- [2] L. Carvalho, E. Wopienka, Ch. Pointner, J. Lundgren, V. Kumar, K. Verma, W. Haslinger, Ch. Schmid, *App. Energy* 2013, **104**, 286.
- [3] H. Liu, J. Chaney, J. Li, Ch. Sun, *Fuel* 2013, **103**, 792.
- [4] B. Ciupek, R. Urbaniak, J. Bartoszewicz, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 3, 90.
- [5] A. Demirbas, *Prog. Energ. Combust.* 2005, **31**, 171.
- [6] O. Eriksson, G. Finnveden, T. Ekvall, A. Bjorklund, *Energy Policy* 2007, **35**, nr 2, 1346.
- [7] B. Ciupek, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 7, 257.
- [8] R. Urbaniak, B. Ciupek, R. Kłosowiak, A. Nygard, *Chem. Eng. Transactions* 2018, **70**, 685.
- [9] B. Ciupek, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 8, 333.
- [10] M. Dzikuć, K. Łasiński, *Int. J. Appl. Mech. Eng.* 2014, **19**, nr 4, 849.
- [11] J. Adamczyk, A. Piwowar, M. Dzikuć, *Environ. Sci. Pollution Res.* 2017, **24**, nr 19, 16316.
- [12] R. Dylewski, J. Adamczyk, *J. Cleaner Prod.* 2016, **137**, 878.
- [13] J. Bartoszewicz, L. Bogusławski, *Arch. Thermodynamic* 2016, **37**, 107.
- [14] J. Bartoszewicz, R. Kłosowiak, L. Bogusławski, *Int. J. Heat Mass Transfer* 2012, **55**, 3239.



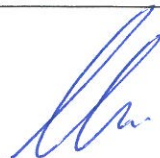
## Szanowni Autorzy!

W związku z napływającymi do nas zapytaniami w sprawie bazy Scopus informujemy, że istnieje możliwość uzupełnienia tej bazy o artykuły opublikowane w *Przemysle Chemicznym*. W tym celu należy skontaktować się z bazą [www.scopus.com](http://www.scopus.com) i poprzez zakładkę „Help/Contact us” uzupełnić wyłącznie pola oznaczone gwiazdką. Po wybraniu zgłaszanego problemu „Missing document(s)” oraz wpisaniu tytułu i roku publikacji należy załączyć plik pdf z publikacją (lub w przypadku jej braku podać w komentarzu nr DOI). Proces dodania publikacji trwa 4 tygodnie. Udostępnienie publikacji w bazie Scopus nie będzie traktowane jako naruszenie przekazanych nam praw autorskich (wyłącznych) do publikacji.

Redakcja

**Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej**

**Bartosz Ciupek**, Edyta Janeba-Bartoszewicz, Rafał Urbaniak, Wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny spalin, Przemysł Chemiczny - 2019, tom 98, nr 8, s. 1283-1285, DOI: 10.15199/62.2019.8.15

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Opracowanie koncepcji i metodyki przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Wytypowanie najważniejszych elementów prowadzonych badań. Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie wniosków końcowych, redakcja tekstu publikacji.	90%	
2.	Edyta Janeba-Bartoszewicz	Wsparcie merytoryczne, synteza rezultatów badań.	5%	
3.	Rafał Urbaniak	Wsparcie merytoryczne, synteza rezultatów badań, redakcja tekstu publikacji.	5%	

# Effect of supply water steam to combustion process of black coal on the chemical composition of exhaust gases

## Wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego na skład chemiczny spalin

DOI: 10.15199/62.2019.11.15

**Solid fuel boiler with the nominal heating power of 15 kW was fired with coal only or with addn. of steam 0.7 or 3.5 kg/h. The steam addn. to combustion process resulted in a decrease of  $\text{NO}_x$  and PM content and in a very large increase in CO content in the exhaust gas. The combustion efficiency was reduced by max. of 4% after steam addn.**

Zbadano wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego w kotle grzewczym, mierząc zmiany emisji substancji szkodliwych. Dzięki otrzymanym wynikom pokazano, że para wodna doprowadzana do procesu spalania węgla kamiennego znacząco wpłynęła na zmianę składu chemicznego spalin: spowodowała obniżenie stężeń masowych emitowanych pyłów (PM) i tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) oraz znaczący wzrost stężenia masowego emitowanego tlenku węgla(II). Oprócz pomiaru stężeń masowych emitowanych substancji szkodliwych, mierzono temperaturę panującą w komorze spalania, temperaturę spalin i zawartość tlenu w spalinach. Na podstawie otrzymanych wyników wyliczono sprawność procesu spalania oraz współczynnik nadmiaru powietrza.

Badania nad nowoczesnymi technologiami obniżania emisji substancji szkodliwych z kotłów grzewczych na paliwa stałe są prowadzone od niedawna<sup>1-4</sup>. W większości prac widać tożsame podejście naukowców przy rozpatrywaniu układu kotła grzewczego jako obiektu technicznego oddziałującego między człowiekiem i środowiskiem<sup>5, 6</sup>.

W publikacjach<sup>7-9</sup> kocioł grzewczy na paliwo stałe był rozpatrywany pod względem termodynamiki jako zamknięty układ niejednorodny z silnym oddziaływaniem na środowisko zewnętrzne, zależnym od parametrów fizyczno-chemicznych użytego paliwa. Co więcej, parametry te wpływały znacząco na zmianę parametrów pracy układu. Podejście to wiązało się z odwzorowaniem skali problemu w postaci emisji substancji szkodliwych, a nie w odniesieniu do chemicznych aspektów procesu spalania. W publikacjach<sup>10, 11</sup> omówiono temat emisji substancji szkodliwych z urządzeń kotłowych nie podlegających ewidencji środowiskowej. Wynika z nich, że wiele obiektów ciepłowniczych znajdujących się blisko siebie ma znaczący udział w emisji substancji szkodliwych na danym terenie. Wyliczone przez badaczy stężenia pyłów w spalinach emitowanych przez kotły przekraczają wielokrotnie założenia norm i dyrektyw.

Skala problemów związanych z emisją substancji szkodliwych na terenie Polski, powstałych przez użytkowanie kotłów grzewczych na paliwa stałe pokazuje konieczność wprowadzenia nowoczesnych technologii pozwalających znacząco ograniczyć ilość emitowanych pyłów do środowiska.

Kwestie związane z wpływem składu chemicznego spalanych paliw na emisję substancji szkodliwych z kotłów poruszono w publikacjach<sup>12, 13</sup>. Ponadto, wcześniejsze badania obejmowały zwykle analizę wpływu konstrukcji urządzeń grzewczych oraz zachodzącego w nich procesu spalania na emisję zanieczyszczeń<sup>14, 15</sup>. Z publikacji<sup>16-19</sup> wynika, że poziom emisji substancji szkodliwych wiąże się bezpośrednio z parametrami technicznymi urządzenia oraz właściwościami spalanego paliwa.

We wcześniej prowadzonych badaniach wykazano znaczący wpływ parametrów technicznych paliwa na zmienność stężeń masowych PM, CO i  $\text{NO}_x$  w spalinach. Ponadto badania nad współspalaniem paliw węglowych z biomasą drzewną i nie drzewną pokazują zbieżne przebiegi emitowanych substancji szkodliwych, co pozwala zastosować analogiczne metody badawcze w przypadku badań urządzeń grzewczych spalanych tymi paliwami<sup>20-24</sup>.

Do badań wybrano węgiel kamienny o parametrach technicznych opisanych składem chemicznym, wartością opałową ( $H_f$ ), sortymentem i zawartością wilgoci ( $W^p$ ). Na podstawie wcześniejszych badań<sup>25-27</sup> stwierdzono, że parametry te najbardziej wpływają na fizykochemiczne aspekty spalania. Przeanalizowano pracę cieplno-emisyjną kotła w trakcie pracy z mocą nominalną bez doprowadzanej pary wodnej oraz z parą wodną wprowadzaną do komory spalania w ilościach 0,7 kg/h oraz 3,5 kg/h.

Mgr inż. Bartosz CIUPEK – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr 8/2019, str. 1283.

\* Adres do korespondencji:

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 665-22-14, GSM: +48 605-916-099, e-mail: bartosz.ciupek@put.poznan.pl

## Część doświadczalna

### Materiały

Do badań zastosowano węgiel kamienny w sortymencie groszek (średnica ziaren 5–25 mm). Parametry techniczne paliwa zamieszczono w tabeli 1. Parę stosowaną w badaniach wytwarzano w zaprojektowanej i skonstruowanej do tego celu parownicy. Była to para mokra o zawilżeniu 100%. Temperatura pary wodnej dostarczanej do komory spalania była w granicach 150–170°C, a jej ciśnienie początkowe wynosiło ok. 3,5 bar. Wydatek pary z parownicy przy pracy z mocą minimalną wynosił 0,7 kg/h, a z mocą nominalną 3,5 kg/h. Zaprojektowana parownica spełniała wszystkie kryteria bezpieczeństwa wymagane przez normy i dyrektywy dla urządzeń ciśnieniowych.

Table 1. Technical parameters of fuel used in tests

Tabela 1. Parametry techniczne paliwa użytego w badaniach

Typ paliwa	Wartość opałowa, MJ/kg	Sortyment, mm	Wilgotność, % obj.	Zawartość (C), % obj.	Zawartość (H), % obj.	Zawartość (O <sub>2</sub> ), % obj.	Zawartość (N), % obj.	Zawartość (S), % obj.	Zawartość popiołu, % obj.
Węgiel kamienny	28,5	5–25	9,5	87,1	3,3	4,5	1,5	0,6	8,0

### Aparatura

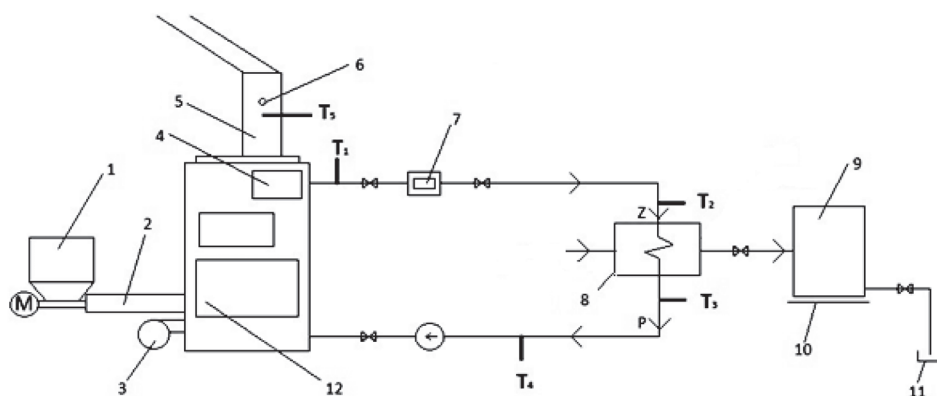
Obiektem badawczym wykorzystanym w testach był kocioł na paliwo stałe typu Vulcanus Plus o mocy znamionowej 15 kW wyposażony w automatyczny palnik retortowy I generacji, spełniający warunki techniczne dla kotłów w klasie 3. W trakcie badań moc cieplna kotła oscylowała wokół mocy znamionowej urządzenia. Amplituda mocy cieplnej wahała się w granicach  $\pm 1$  kW od mocy znamionowej. Zawartość O<sub>2</sub> w spalinach mierzono za pomocą analizatora spalin BCA-01. Jego zakres pomiarowy wynosił 0–25% obj. tlenu, a błąd pomiarowy  $\pm 0,8\%$ . Jako element pomiarowy producent zastosował układ cyrkonowy umożliwiający pomiar tlenu resztkowego w spalinach nawet przy dużym zawilżeniu i zapyleniu spalin. Stężenia masowe CO i NO<sub>x</sub> mierzono analizatorem spalin Testo 350 XL, wyposażonym w fotochemiczne cele pomiarowe. Czas analizy ustalono jako jedno próbkowanie na sekundę. To ustawienie wynikało z możliwości wystąpienia chwilowych wysokich stężeń CO (powyżej 5000 ppm). Dokładność pomiaru CO wynosiła  $\pm 5\%$ , a NO<sub>x</sub>  $\pm 3\%$ . Do pomiaru stężenia masowego pyłu w spalinach wykorzystano pyłomierz grawimetryczny Testo 380. Czas poboru próbki i analizy zapylenia spalin to 30 min. Do pomiaru temperatur wykorzystano termopary typu K (NiCr-Ni) o zakresie pomiarowym od –200°C do +1370°C i błędzie pomiarowym  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Strata ciepła w instalacji grzewczej wynosiła ok.  $\pm 2,5\%$  strumienia entalpii paliwa. Wytworzone ciepło było odbierane przez układ płytowych wymienników ciepła o maksymalnej mocy 200 kW.

### Metodyka badań

Przeprowadzono pomiary dla 3 cykli badawczych. W pierwszym cyklu zbadano poziom emisji substancji szkodliwych dla kotła opalanego w sposób automatyczny węglem kamiennym, wyniki otrzymane z tej próby posłużyły jako dane wyjściowe informujące

o poziomie emisji zanieczyszczeń z urządzenia. W kolejnym cyklu zbadano emisję substancji szkodliwych przy doprowadzeniu do komory spalania kotła pary wodnej w ilości 0,7 kg/h. W ostatnim cyklu przeprowadzono analogiczne badania jak w cyklu drugim, ale strumień masy pary wodnej doprowadzanej do reakcji spalania wynosił 3,5 kg/h.

Pomiary prowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Dane pomiarowe rejestrowano za pomocą komputera PC oraz układu kart pomiarowych typu ADAM-4118. Komputer gromadził dane pomiarowe z analizatorów spalin, a karty pomiarowe i przeznaczony do nich program rejestracyjny mierzyły temperaturę. Stężenia masowe CO, NO<sub>x</sub> i PM zostały przeliczone na mg/m<sup>3</sup> dla 10% O<sub>2</sub> w spalinach. Przeliczenie to wynikało z założeń emisyjnych stawianych kotłom zgodnie z normą<sup>28</sup>. Temperatura spalin ( $T_{sp}$ ) była średnią wartością z pomia-



1 – zbiornik paliwa, 2 – palnik, 3 – wentylator, 4 – układ sterowania, 5 – komin pomiarowy, 6 – króciec pomiaru składu chemicznego spalin, 7 – przepływomierz, 8 – układ wymiennika ciepła, 9, 10 – wagowe stanowisko pomiaru strumienia masy wody chłodzącej, 11 – odpływ, 12 – doprowadzenie pary wodnej do komory spalania,  $T_1$  – pomiar temperatury wody wypływającej z kotła,  $T_2$  – pomiar temperatury wody wpływającej do wymiennika ciepła,  $T_3$  – pomiar temperatury wody wypływającej z wymiennika ciepła,  $T_4$  – pomiar temperatury wody wpływającej do kotła,  $T_5$  – pomiar temperatury spalin

Fig. 1. Scheme of the test stand

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

ru wykonywanego przez 5 termopar. Temperatura w komorze spalania ( $T_{KS}$ ) była rejestrowana na głębokości ok. 20 cm od pokrywy przedniej kotła z ulokowanym czujnikiem w odległości ok. 20 cm od powierzchni paleniska. W celu określenia zużycia paliwa przez kocioł mierzono masę wsadu paliwa przed badaniami i po skończonych badaniach. Na podstawie zużytego paliwa w czasie badań określano strumień masy spalanego paliwa. Dodatkowo na podstawie rejestrowanych danych obliczano współczynnik nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) i sprawność cieplną kotła ( $\eta$ ).

### Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki badań dla pierwszego cyklu podano w tabeli 2. Uzyskane rozkłady emisji substancji szkodliwych przedstawiono na rys. 2. Otrzymane wyniki wskazywały, że kocioł spełniał deklarowaną przez producenta 3 klasę dla kotłów z automatycznym załadunkiem paliwa. Kocioł pracował w zakresie wartości współczynnika  $\lambda$  1,34–1,87. Zakres temperatury spalin wynosił 216–245°C. Sprawność procesu spalania mieściła się w przedziale 88–93%.

Table 2. Results of the first cycle test

Tabela 2. Wyniki pierwszego cyklu badań

Wartość	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>KS</sub> , °C	T <sub>SP</sub> , °C	λ	η, %
Średnia	7,00±0,10	100,90±3,20	295,00±2,60	90,10±5,00	751±1	231±1	1,50	91,33±0,50
Minimalna	5,30±0,10	13,00±3,60	205,00±2,30	35,00±5,00	655±1	216±1	1,34	88,60±0,50
Maksymalna	9,70±0,10	780,00±3,10	406,00±2,40	229,00±5,00	845±1	245±1	1,87	93,27±0,50

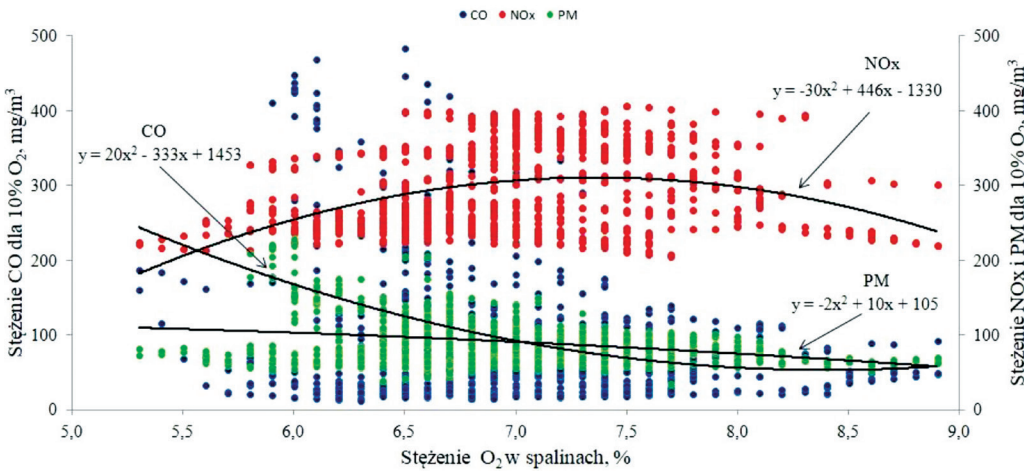


Fig. 2. Emissions of harmful substances for first cycle

Rys. 2. Emisje substancji szkodliwych w pierwszym cyklu badań

Wyniki dla drugiego cyklu badań przedstawiono w tabeli 3. Przykładowy przebieg zmian temperatury i emisji substancji szkodliwych podczas doprowadzania 0,7 kg/h pary wodnej do procesu spalania zaprezentowano na rys. 3. Otrzymane rozkłady emisji pokazano na rys. 4. Na podstawie wyników zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej do procesu spalania spowodowało wzrost ilości emitowanego CO o ok. 157%. Emisja pyłów zmalała względem normalnej pracy kotła o ok. 19%. Emisja NO<sub>x</sub> spadła o ok. 4%, o taką też wartość zmalała sprawność procesu spalania. W spalinach wykryto obecność wodoru (H<sub>2</sub>) w ilości 5,60 mg/m<sup>3</sup>. Na zaprezentowanym przebiegu widać, że w momencie wtrysnięcia pary wodnej do komory spalania nastąpiła detekcja H<sub>2</sub> w spalinach. Ponadto gwałtownie wzrastała ilość emitowanego CO i malała ilość emitowanych PM. W trakcie dostarczania pary wodnej do komory spalania zaobserwowano obniżenie temperatury spalin o ok. 15°C oraz temperatury panującej w komorze spalania o ok. 46°C, co korzystnie wpłynęło na zmniejszenie ilości NO<sub>x</sub> powstających w procesach termicznych.

Wyniki dla trzeciego cyklu badań przedstawiono w tabeli 4. Przykładowy przebieg zmian temperatury i emisji substancji szkodliwych podczas doprowa-

dzania 3,5 kg/h pary wodnej do procesu spalania zaprezentowano na rys. 5. Otrzymane rozkłady emisji pokazano na rys. 6. Zaobserwowano, że ilość emitowanego CO względem standardowego procesu spalania wzrosła o ok. 268%. Wprowadzenie pary wodnej do procesu spalania spowodowało zmniejszenie emisji PM o ok. 20%. Emisja NO<sub>x</sub> względem emisji z niemodyfikowanego procesu spalania nie uległa zmianie. Sprawność procesu spalania zmalała o ok. 1%. W spalinach wykryto H<sub>2</sub> w ilości 5,25 mg/m<sup>3</sup>. Średnia temperatura spalin dla procesu spalania z dodatkową parą wodną w ilości 3,5 kg/h była niższa o 30°C, a temperatura w komorze spalania zmalała o ok. 86°C. Obniżenie temperatury panującej w komorze spalania wpłynęło na zmniejszenie maksymalnych stężeń emitowanych NO<sub>x</sub> o ok. 20 mg/m<sup>3</sup>.

## Podsumowanie

Podstawą badań była chęć określenia zasadności stosowania pary wodnej w komorach spalania kotłów grzewczych na paliwa stałe w celu przeprowadzenia reakcji chemicznej:  $C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$ , której efektem jest utlenie-

Table 3. Results of the second cycle test

Tabela 3. Wyniki drugiego cyklu badań

Wartość	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>KS</sub> , °C	T <sub>SP</sub> , °C	λ	η, %
Średnia	9,00±0,10	257,90±3,80	283,90±2,40	72,60±5,00	705±1	215±1	1,81	88,10±0,50
Minimalna	6,00±0,10	54,80±3,30	197,20±2,10	31,00±5,00	625±1	195±1	1,40	83,10±0,50
Maksymalna	13,30±0,10	722,80±3,20	386,90±2,80	117,00±5,00	780±1	231±1	2,74	90,40±0,50

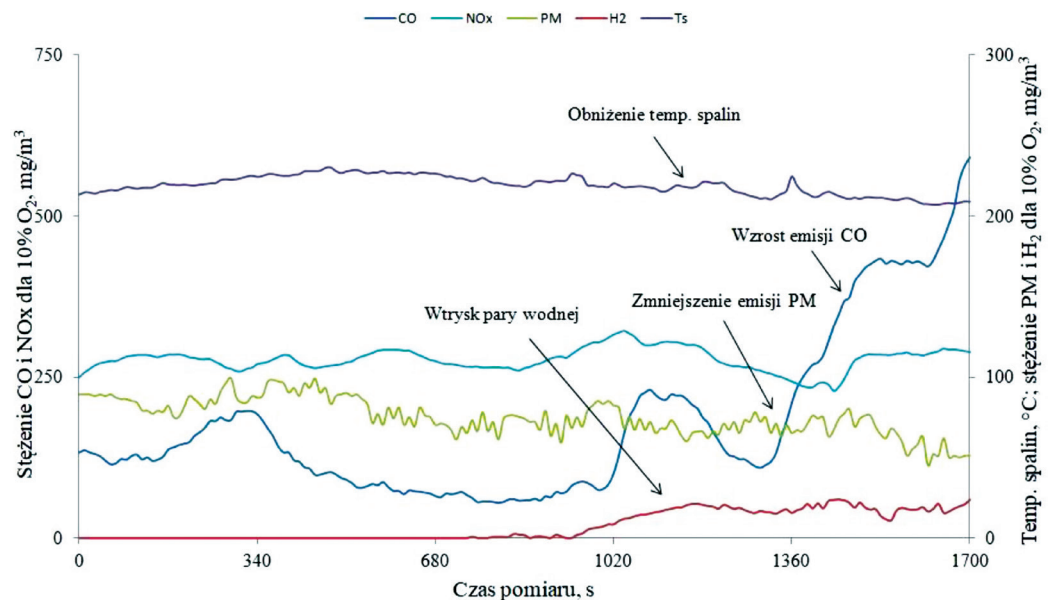


Fig. 3. The course of emissions and temperature for second cycle

Rys. 3. Zmiany w czasie emisji substancji szkodliwych i temperatury spalin w drugim cyklu badań

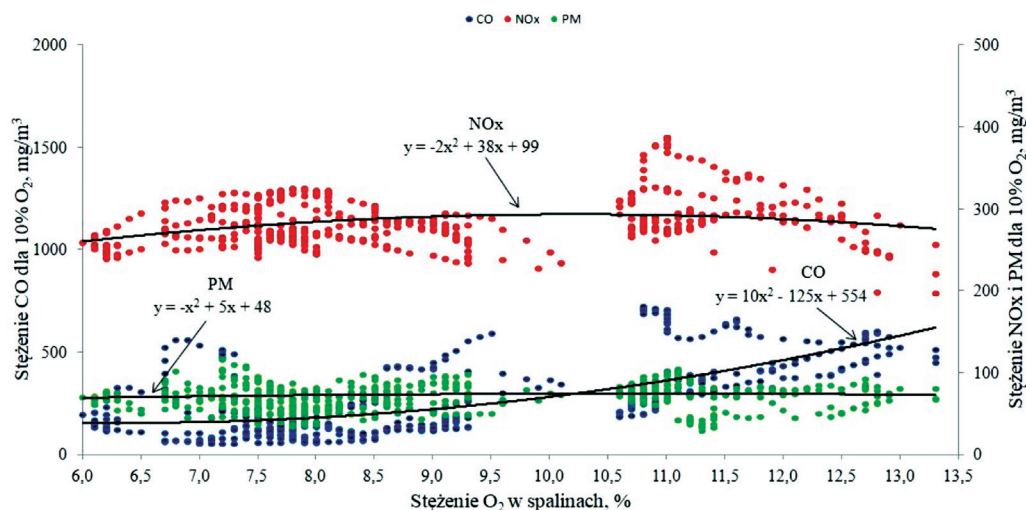


Fig. 4. Emissions of harmful substances for second cycle

Rys. 4. Emisje substancji szkodliwych w drugim cyklu badań

Table 4. Results of the third cycle test

Tabela 4. Wyniki trzeciego cyklu badań

Wartość	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>KS</sub> , °C	T <sub>SP</sub> , °C	λ	η, %
Średnia	8,40±0,10	370,90±3,30	295,90±2,50	72,00±5,00	665±1	199±1	1,68	90,10±0,50
Minimalna	7,00±0,10	48,30±3,70	114,20±2,50	54,00±5,00	602±1	180±1	1,50	87,00±0,50
Maksymalna	10,90±0,10	1964,30±3,40	386,50±2,80	100,00±5,00	728±1	219±1	2,08	91,40±0,50

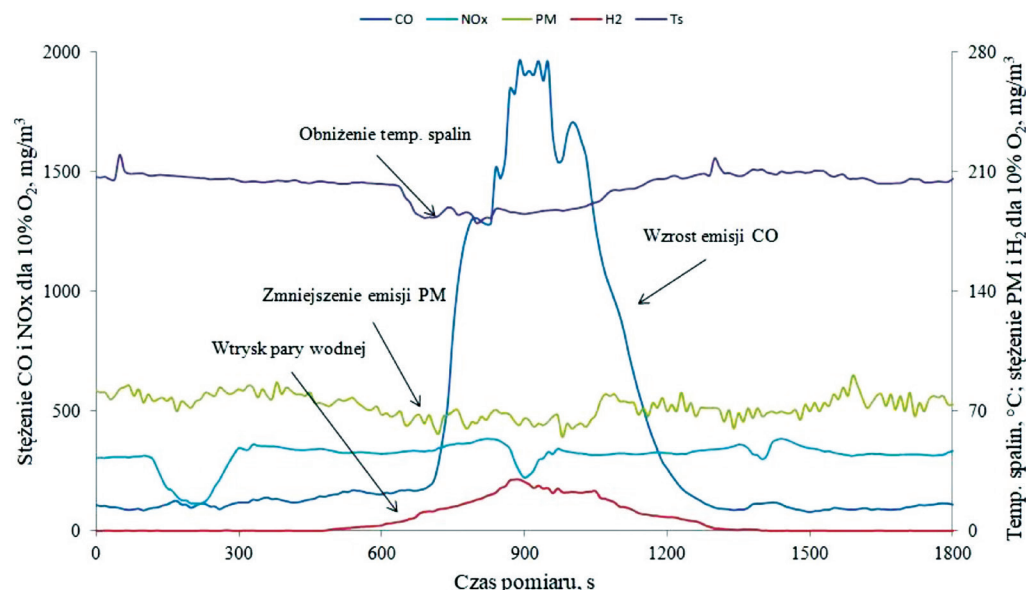


Fig. 5. The course of emissions and temperature for third cycle

Rys. 5. Zmiany w czasie emisji substancji szkodliwych i temperatury spalin w trzecim cyklu badań

nie węgla pierwiastkowego wchodzącego w skład m.in. sadzy (palne produkty w dalszej części procesu spalania mogą zostać utlenione). Doprowadzenie pary wodnej mokrej do procesu spalania węgla kamiennego spowodowało znaczący wzrost emisji CO oraz detekcję H<sub>2</sub> w spalinach. Wyniki te potwierdziły możliwość inicjacji tej reakcji chemicznej w komorze spalania. Efektem dodania pary wodnej do procesu spalania oraz zachodzącej reakcji chemicznej było zmniejszenie ilości emitowanej sadzy, mierzonej jako pył (PM). Nie osiągnięto całkowitego ograniczenia emisji PM, ponieważ w skład paliwa wchodziło ok. 8,0% popiołu mineralnego, który nie podlegał procesowi utleniania. Na podstawie otrzymanych wyników wyliczo-

no, że średni spadek ilości emitowanych PM wynosi ok. 20%, co jest bardzo zadowalającym rezultatem. Zaobserwowano też obniżenie emisji tlenków azotu. Doprowadzenie pary wodnej do procesu spalania kotła grzewczego zasilanego paliwami stałymi wpływa znacząco na poziom emitowanych substancji szkodliwych, co potwierdza wpływ doprowadzanej pary wodnej na zmianę chemizmu reakcji spalania.

Doprowadzenie pary wodnej do komory spalania spowodowało obniżenie panującej w niej temperatury, co przyczyniło się do obniżenia temperatury spalin (efektem tego było zmniejszenie stężeń masowych NO<sub>x</sub> i PM w spalinach). Z punktu widzenia termodynamiki obniżenie temperatury panującej w komorze spalania spowodowało zmniejszenie intensyfikacji wymiany ciepła między gazami spalinyowymi a czynnikiem grzewczym, co wpłynęło na niewielkie (1–4%) obniżenie sprawności procesu spalania. Otrzymane wyniki badań dają przesłankę do dalszych prac badawczych nad wpływem doprowadzanej pary wodnej do procesu spalania na skład chemiczny spalin. W przypadku klasycznych konstrukcji kotłów grzewczych doprowadzenie pary wodnej wpływa korzystnie na obniżenie emisji NO<sub>x</sub> i PM, jednak powoduje wielokrotne zwiększenie ilości emitowanego CO. Na podstawie otrzymanych wyników podjęto decyzję o skonstruowaniu prototypowego kotła grzewczego zaopatrzonego w komorę dopalającą. Głównym zadaniem komory dopalającej będzie redukcja powstałego w procesie spalania tlenku węgla. Cel ten jest o tyle ważny, że na podstawie zaprezentowanych badań widać znaczącą intensyfikację ilości emitowanego CO przy doprowadzeniu pary wodnej do procesu spalania.

Praca wykonana w ramach projektu naukowego nr POIR.04.01.04-00-0135/16 „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwo stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej”, finansowanego przez NCBR.

Otrzymano: 05-08-2019

#### LITERATURA

- [1] J. Konieczny, B. Komosiński, E. Cieślak, T. Konieczny, B. Mathews, T. Rachwał, G. Rzońca, *Arch. Environ. Prot.* 2017, **43**, nr 2, 20.
- [2] M. Półka, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1514.
- [3] R. Barranco, M. Gong, A. Thompson, M. Cloke, S. Hanson, W. Gibb, E. Lester, *Fuel* 2007, **86**, 2521.

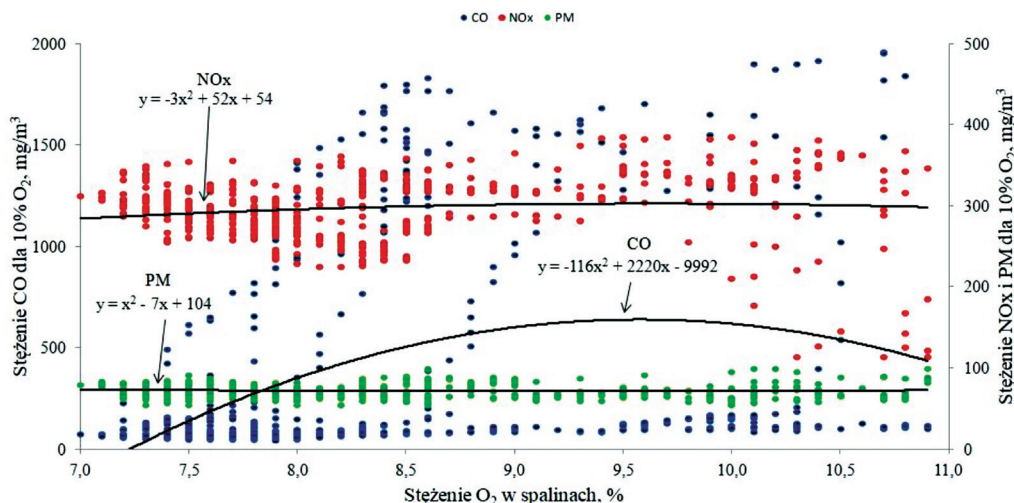


Fig. 6. Emissions of harmful substances for third cycle

Rys. 6. Emisje substancji szkodliwych w trzecim cyklu badań

- [4] G. Czernski, T. Dziok, A. Strugała, S. Porada, *Przem. Chem.* 2014, **93**, nr 8, 1393.
- [5] P. Janusz, *Polityka Energ.* 2013, **13**, nr 1, 23.
- [6] K. Hebda, Ł. Habera, A. Frodyma, Z. Wilk, P. Koślik, J. Hadzik, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 7, 1064.
- [7] J. Dias, M. Costa, J.L.T. Azevedo, *Biomass Bioenergy* 2004, **27**, nr 6, 531.
- [8] V.K. Verma, S. Bram, G. Gauthier, J. De Ruyck, *Biomass Bioenergy* 2011, **35**, nr 1, 80.
- [9] L. Carvalho, E. Wopienka, J. Lundgren, *Int. J. Energy Clean Environ.* 2008, **9**, 127.
- [10] G. Stubenberger, R. Scharler, S. Zahirović, I. Obernberger, *Fuel* 2008, **87**, nr 6, 793.
- [11] A. Caseiro, H. Bauer, C. Schmidl, C.A. Pio, H. Puxbaum, *Atmos. Environ.* 2009, **43**, nr 13, 2186.
- [12] B. Ciupek, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 8, 333.
- [13] M. Pronobis, *Fuel* 2006, **85**, 474.
- [14] O. Sippula, T. Lind, J. Jokiniemi, *Fuel* 2008, **87**, nr 12, 2425.
- [15] M. Rashid, M.M. Syahirah, J. Nor-Ruwaida, N. Huda, *Agricult. Agricult. Sci. Procedia* 2014, **2**, 265.
- [16] A. Sobolewski, T. Chmielniak, T. Topolnicka, G. Świeca, *Przegl. Górn.* 2013, **69**, nr 2, 174.
- [17] S. Porada, P. Grzywacz, G. Czernski, K. Kogut, D. Makowska, *Polityka Energ. Energy Policy J.* 2014, **17**, nr 4, 89.
- [18] B. Karwat, R. Machnik, J. Niedźwiedzki, M. Nogaj, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1480.
- [19] B. Staiger, S. Unterberger, R. Berger, K.R.G. Hein, *Energy* 2005, **30**, nr 8, 1429.
- [20] I. Aarna, E. Suuberg, *Energy Fuels* 1999, **15**, nr 6, 1359.
- [21] T. Runge, P. Wipperfurth, C. Zhang, *Biofuels* 2014, **4**, 73.
- [22] T. Dziok, M. Hryniewicz, A. Janewicz, B. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 9, 1852.
- [23] B. Joseph, F. Hensgen, L. Bühle, M. Wachendorf, *Energies* 2018, **11**, 3011.
- [24] K. Hamala, L. Rög, *Pr. Nauk. GIG. Górnictwo Środowisko* 2003, **4**, 81.
- [25] B. Ciupek, R. Urbaniak, J. Bartoszewicz, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 3, 90.
- [26] B. Ciupek, *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 2018, **49**, nr 7, 257.
- [27] B. Ciupek, E. Janeba-Bartoszewicz, R. Urbaniak, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 8, 1000.
- [28] PN-EN 303-5:2012, *Kotły grzewcze. Cz. 5. Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW. Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.*

Politechnika Wroclawska  
 Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
 Instytut Nowych Syntezy Chemicznych w Puławach  
 Centrum Naukowo-Badawcze Chemii, Agrochemii i Ochrony Środowiska  
 AGROPHOS we Wrocławiu  
 Polskie Towarzystwo Chemiczne  
 zapraszają do wzięcia udziału w

## 44. Międzynarodowym Seminarium Naukowo-Technicznym Chemistry for Agriculture

które odbędzie się w dniach 24–27 listopada 2019 r.  
 w ośrodku konferencyjno-wypoczynkowym Sandra SPA w Karpaczu.

### Tematyka Seminarium obejmuje następujące zagadnienia:

- chemia – badania podstawowe
- technologia chemiczna: nawozy mineralne fosforany paszowe i inne dodatki
- chemia rolna, przemiany składników nawozowych w glebie ich przyswajalność przez rośliny
- problem fosforu i azotu w ochronie środowiska
- ekotoksykologia – wybrane problemy
- nowe metody i technologie produktów chemicznych stosowanych w rolnictwie
- wpływ produktów chemicznych na produkcję roślinną i zwierzęcą
- metale ciężkie w rolnictwie
- obieg metali w środowisku przyrodniczo-rolniczym
- utylizacja odpadów
- ochrona środowiska
- biotechnologia dla rolnictwa

### Organizatorzy zachęcają również do udziału w spotkaniach tzw. "Meeting Rooms: Science for Business" w następujących blokach tematycznych:

1. Nawozy, bionawozy i biostymulatory wzrostu roślin
2. Środki ochrony roślin
3. Pasze i dodatki paszowe

Ponadto, w trakcie trwania Seminarium Organizatorzy umożliwiają organizację spotkań Konsorcjów Grantowych, w ramach wydzielonych, zamkniętych sesji tematycznych, przeznaczonych dla Członków Konsorcjum, z możliwością publikacji.

Termin nadsyłania zgłoszeń: do **12 listopada 2019 r.**

Szczegółowe informacje o Seminarium, opłatach, dane kontaktowe oraz rejestracja pod adresem: [www.chemistryforagriculture.pl](http://www.chemistryforagriculture.pl).

**Organizatorzy serdecznie zapraszają do udziału w Seminarium!**





# Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber

W. Judt<sup>\*</sup>, B. Ciupek, R. Urbaniak

Poznań University of Technology, Institute of Thermal Engineering, ul. Piotrowo 3, 60-965, Poznań, Poland



## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 21 November 2019

Received in revised form

30 January 2020

Accepted 3 February 2020

Available online 10 February 2020

### Keywords:

Heating boilers

Solid fuels

Heat transfer

Work optimization

Ansys fluent

CFD

## ABSTRACT

The paper presents a numerical study of a heat transfer process realized in a three draughts low power heating boiler for solid fuels combustion equipped with an afterburning chamber. The main reason for the proposed research is to define the character of an exhaust gas flow through the special construction of heating device at different levels of the heat loading. Heating boiler construction allows for dividing stream of the flue gases into two separated streams. One part of the stream is transferred directly to the afterburning chamber and omits first two draughts of the heating boiler, where the rest of exhausts is directed to. Authors simulated the limitation of exhaust streams division into the afterburning chamber in order optimize the heat transfer process. Obtained results showed that the character of exhaust gas flow strongly depends on the amount of heating power of the heating device. Changes in exhaust gas flow caused increasing of heating power obtained for the nominal load by 4.2%. Similar effect was not visible during heating boiler work with minimal level of the heat load.

© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Low power heating boilers are very often used in domestic applications as a primary source of heat. Heating systems based on solid fuels are very popular in Polish households. According to Ref. [1] about 35% of energy consumption in the residential sector for heating purposes is related to the hard coal combustion. In The United Kingdom, only 7% of the energy used in single-family houses comes from coal combustion. Effects are well visible in measurements of air quality in the European Union (EU). Poland has the worst air quality among all of the countries of the EU [2]. The main factor responsible for the bad quality of air in Poland is the combustion of low-quality solid fuels and incinerating household garbage by the residential sector. Combustion is often performed in old, uncertified heating boilers, that do not fulfill requirements of efficiency and level of emission of harmful compounds of exhaust gases.

Therefore the European Parliament introduced the Regulation 2015/1189 [3] and 2009/125/EC [4] directive enforcing the implementation of the above. Pack of directives connected with energy savings is popularly named Ecodesign requirements. Article 16 of

the mentioned directive states, that the European Commission is required to implement certain requirements for heating devices, which lead to a limitation of greenhouse gas emission. The requirements cover energy efficiency and air pollutant emissions into the atmosphere. Limitation of pollution is connected with lower fuel consumption by increasing the overall efficiency of heating devices. Mentioned requirements are mandatory from 2020 for all manufacturers and suppliers of solid fuel boilers with a rated heat output of 70 kW or less wishing to sell their products in the EU. According to the directive requirements, heating boilers will be divided into groups according to the seasonal space heating energy efficiency parameter and are labeled just as domestic appliances. Ecodesign defines the parameter of the seasonal space heating energy efficiency according to equation (1).

$$\eta_{\text{son}} = 0.85 \cdot \eta_p + 0.15 \cdot \eta_n \quad (1)$$

Parameter  $\eta_n$  is the energy efficiency of the heating device at the nominal heat load. Parameter  $\eta_p$  determines energy efficiency at the minimal power of the heating boiler and depends on the fuel delivery method to the combustion process. Boilers equipped with automatic feeders fall in the range of  $\eta_p$  of 30% of nominal power. Manual feed boilers fall in 50% of nominal power. The above equation is derived from the real heat load of heating boilers used in domestic applications throughout the whole year. The legislator

<sup>\*</sup> Corresponding author.

E-mail address: [wojciech.judt@put.poznan.pl](mailto:wojciech.judt@put.poznan.pl) (W. Judt).

Nomenclature			
A	ash content - wt. %	$\Delta t$	temperature difference - °C
$c_p$	specific heat - $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\eta$	energy efficiency - %
C	carbon content - wt. %	$\eta_n$	energy efficiency at nominal power - %
F	area of cross-section of draught - $\text{m}^2$	$\eta_p$	energy efficiency at minimal power - %
H	hydrogen content - wt. %	$\eta_{\text{son}}$	seasonal space heating energy efficiency - %
$\dot{m}$	mass flow - $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho$	density - $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
M	moisture content - wt. %	<i>Abbreviations</i>	
N	nitrogen content - wt. %	CFD	Computational Fluid Dynamics
O	oxygen content - wt. %	C1 – C2	line of tubes
$p_d$	pressure drop – Pa	$D_1$	first draught
P	real power of heating boiler – kW	eg	exhaust gas
$P_n$	boiler power level – %	EU	European Union
$\dot{Q}$	heat flux - W	f	fuel
r	relative flow - %	max	maximum
S	sulfur content - wt. %	out	outlet
t	temperature - °C	R1 – R4	row of tubes
u	velocity - $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$R_x$	appointed row of tubes
$W_u$	low calorific value of combusted fuel - $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	w	water
$y^+$	dimensionless wall distance	z	appointed thermodynamic parameter (density, specific heat, heat conduction, kinematic viscosity)

noticed that 85% of the annual heating boilers work with minimal heating power. The assumed value corresponds with real conditions of solid fuel heating boilers operation during the season.

Improvement of seasonal energy efficiency required to look at a heat transfer process realized in the heating devices. So far the heat transfer process was analyzed usually in high power boilers used in power plants. Source [5] presents a dynamic heat transfer model for the estimation of exhaust temperature for the coal-fired utility boiler. Papers [6–9] raise the issue of a heat transfer process in wall-fired pulverized coal boilers equipped with swirl burners. Heat transfer realized in power boiler superheaters was also analyzed by authors of papers [10–12]. Thermal stresses of critical elements of steam boilers during the heat transfer process were taken into account by Taler et al. [13]. Heat transfer characteristics were also analyzed for large-scale bubbling fluidized bed boilers [14,15], and grate boilers [16,17]. Also, a numerical study is used in the analysis of the heat transfer process in boilers used in thermal plants. Gu et al. [18] analyzed a heat transfer process for supercritical water in rifled tubes with a comparison of heat transfer between smooth and internally ribbed tubes [19] during the steam production. A wide range of information about the limitation of energy waste in industrial boilers is collected in a review proposed by Barma et al. [20].

A Computational Fluid Dynamics analysis prepared for low power heating boilers to a small extent raises the issue of the heat transfer process based on the character of the work of heating devices. A team of researchers from the University of Vigo conducts the numerical simulations of biomass combustion for heat load equal to around 30 kW [21–24]. Numerical calculations were also prepared for the combustion of wood logs in 8 kW stove [25] and wood pellets in a 13 kW heating power stove [26]. The study [27] raises the issue of biomass combustion in small-scale boilers in a simple construction of the combustion chamber. CFD workflow during modeling of fixed-bed biomass combustion in industrial and small scale boilers are presented in Ref. [28]. Coal combustion modeling in small domestic boilers is analyzed in Refs. [29–31]. The application of numerical methods for the definition and optimization of the thermal cycle for low power boilers are shown in papers [32,33]. In an earlier study [34] authors analyzed the temperature

distribution in an outdated type of low power boiler. Paper [35] presents the application of CFD methods for simulation of grate-fired biomass boilers intended for semi-industrial or multi-family residential applications.

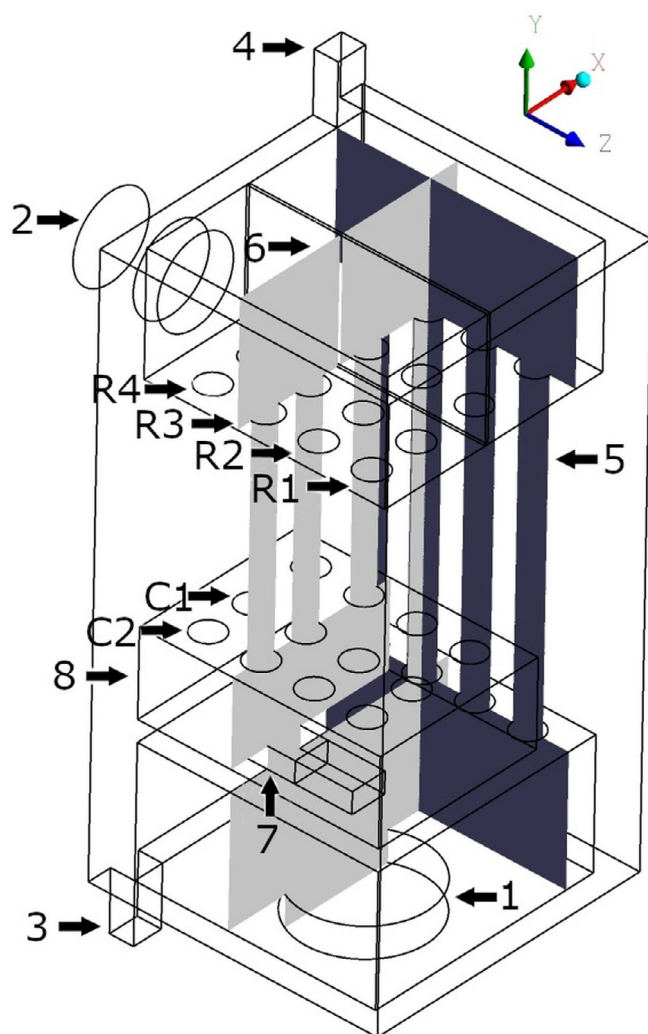
However, CFD methods are intensively used for heat transfer and fluid flow analysis in heat exchangers and furnaces intended for industrial purposes. The study [36] deals with heat transfer modeling in modular heat exchanger used as an economizer, which recovers waste heat from a steam boiler. Work [37] raises the issue of conjugate heat transfer in pumped heat energy storage system. Authors of paper [38] analyzed a heat transfer process during cylinder heating in the heat-treating furnace.

Mentioned papers use CFD methods for low power solid fuel boilers do not discuss the inequality of exhaust gas flow through the heat exchanger chamber. Calculations are usually prepared for simple combustion chambers, where the exhaust gas stream is not split into separated parts directed in different directions.

The main objective of the study is the recognition of the character of exhaust gas flow inside the complex construction of a low power heating boiler by CFD methods. Conducted research concerns on the character of the heat transfer process during heating boiler work with various heat load and variable exploitation parameters. The motivation of authors is focused on the improvement of energy efficiency in domestic heating devices based on the real-life operating conditions. In consequence, it leads to the limitation of fuel consumption and, as a result, the reduction of human influence on the natural environment.

## 2. Setup

The research was prepared for the construction of the heating boiler presented in Fig. 1. The mentioned heater achieves heat load equivalent to 18 kW. Boilers that attain that level of power are designed for domestic applications such as heating and preparation of hot water for sanitary use. The mentioned device is a three draught heating boiler for solid fuel equipped with an afterburning chamber. The location of heating boiler draughts is shown in Fig. 2. Two first draughts are composed of four equidistant pipes arranged in a row. The third draught is composed of eight pipes arranged in



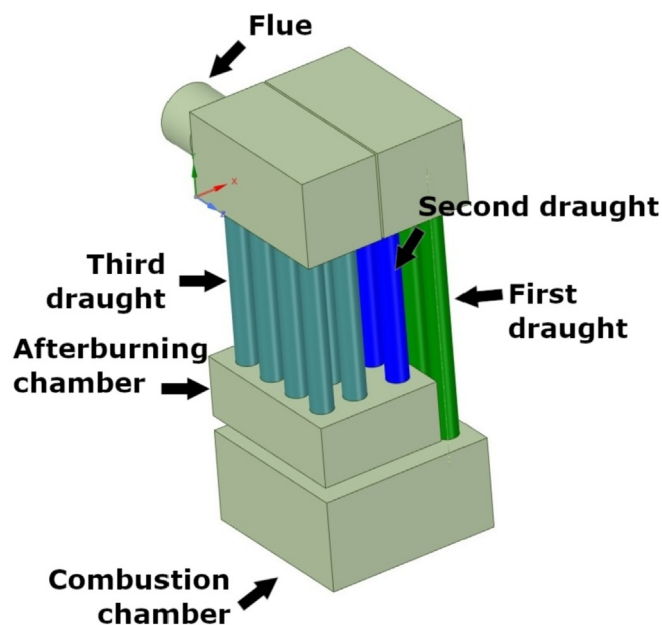
**Fig. 1.** Construction of the heating boiler with marked crucial planes (XY and YZ) used in results analysis, 1 – combustion chamber, 2 – flue, 3 – water inlet, 4 – water outlet, 5 – plane YZ, 6 – plane XY, 7 – directly connection between combustion chamber and the afterburning chamber, 8 – afterburning chamber, C1-2 – lines of pipes in the draught, R1-R4 – rows of pipes in the draught.

two parallel lines. The boiler is designed for coal combustion in the retort burner with automatic fuel delivery.

Construction of the heating device allows for dividing exhaust gases into two separate streams. The operation scheme of the heating boiler is shown in Fig. 3. One portion of the flue gas is directed to the afterburning chamber through the first and second draught. The second portion of fumes flows directly from the combustion area to the afterburning chamber. Two parts of exhaust gas with different temperatures are then mixed inside the afterburning chamber. The main task of that element is to combust flammable compounds present in exhaust gases, which left from the combustion chamber. The third draught is responsible for extracting the fumes from the afterburning chamber into the flue, where gases are disposed into the atmosphere.

### 3. Methodology

Numerical analysis was prepared for 30% and 100% of the nominal power of the heating boiler. Mentioned levels of the heat load arise from Ecodesign requirements. Calculations were



**Fig. 2.** Draughts location in the heating boiler structure.

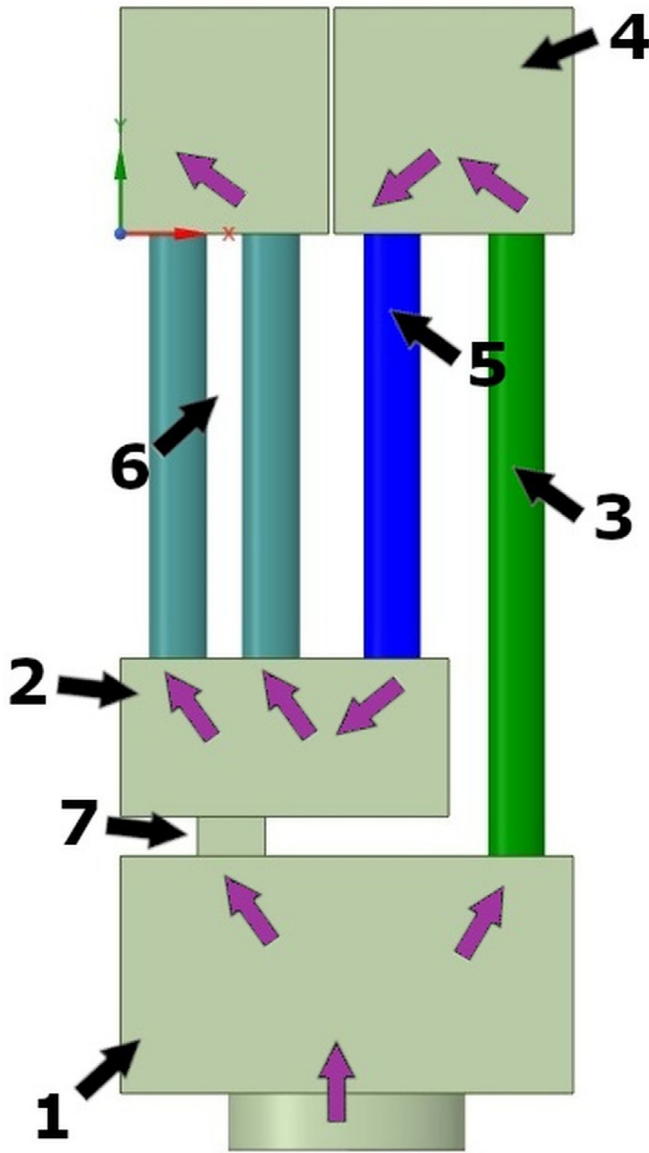
prepared in the ANSYS Fluent environment. The flow is analyzed based on the mass flow rate of exhaust gases, flowing directly to the afterburning chamber. The numerical model predicts two configurations of the duct 7 showed in Fig. 3. In the first case, the flow through the duct is unbound according to the heating boiler construction. In the second case, a cross-section of the duct is limited to 50%. The main reason for that approach is to show, how the heat load will change during the limitation of flow from the combustion chamber to the afterburning chamber and in consequence directing the higher amount of exhaust gas flow through the first and second draught.

#### 3.1. Mesh used in numerical modeling

An unstructured, polyhedral mesh is generated in the Fluent Meshing Software. The quality and sizing parameters of the used grid are shown in Table 1. A boundary layer first element height is prepared for  $y^+$  parameter equal 1. Polyhedral grids combine the advantages of the application of hexahedral and tetrahedral elements. Hexahedral elements are less sensitive for numerical diffusion as tetrahedral grids. Tetrahedral meshes are generated in a convenient way by an application of automatic algorithms that allow for the meshing of complex domains. As a convergence criteria, a balance of energy and mass flow of the working medium is used. Also, a temperature of working mediums at the outlet from the domain was taken as the criterion of the convergence of simulations. Increasing the number of cells in the computational grid does not provide a more accurate solution.

#### 3.2. Boundary conditions

As a working media exhaust gas and water are used. Thermodynamic properties, having an impact on a heat transfer by convection were defined as a function of the temperature of exhaust gas. The parameters are density, specific heat, heat conduction and kinematic viscosity. Values of the aforementioned parameters are derived from properties of primary compounds of the exhaust gas composition as a function of temperature according to the equation (2)



**Fig. 3.** The operation scheme of heating boiler work, 1 – combustion chamber, 2 – afterburning chamber, 3 – first draught, 4 – reversing chamber, 5 – second draught, 6 – third draught, 7 – channel connecting combustion and afterburning chambers.

**Table 1**  
Parameters of the grid used in the numerical calculations.

Number of elements	Orthogonal quality		Skewness	
	min	ave	max	ave
3.9 mln	0.10	0.83	0.87	0.12

$$z_{t_{eg}} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot z_{i,t_{eg}} \cdot \frac{273 \text{ K}}{273 \text{ K} + t_{eg}} \quad (2)$$

where 1 – CO<sub>2</sub>, 2 – N<sub>2</sub>, 3 – O<sub>2</sub>, 4 – H<sub>2</sub>O.

Specific heat, heat conduction and kinematic viscosity for water are defined as a constant and are derived from the average temperature of water in the domain. Usually, a water temperature difference for low power heating boilers ranges between 10 and 15 °C and such temperature difference in this range does not cause

a major change in physical properties.

The density of water is modeled as a function of temperature in a range of temperature changes according to Kell's formulation [39]. The omission of the differential density of water as a function of temperature causes problems with the natural mass movements in the water domain. This leads to the adulteration of a local temperature difference between the flue gas and the cooling water and causes flawed computation of heat transfer in the whole domain of the modeled heating device.

Heat transfer by radiation in the modeled heating boiler is simulated by the application of the Discrete Ordinates model of radiation. This method is sufficient for the solution of radiation heat transfer for non-grey problems in semi-finite and finite mediums. The considered model allows for scattering modeling with complete frequency redistribution and continuum absorption [40].

In a numerical model, the  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport) model of turbulence was used. This model is based on the combination of  $k-\omega$  and  $k-\epsilon$  models. Wilcox's  $k-\omega$  model is activated for calculation in the inner region of the boundary layer. The  $k-\epsilon$  model is solved in the free stream area [41].

Boundary conditions at the inlet to the domain for both fluids are defined as the mass flow. The amount of fuel  $\dot{m}_f$  required for obtaining a power of conversion process results from the definition of the efficiency according to the equation (3).

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\eta \cdot W_u} \quad (3)$$

Quantity of exhaust gas  $\dot{m}_{eg}$ , which is flowing through the domain depends on the power of the combustion process and in consequence from the mass flow of fuel delivered to the burner. The amount of exhaust gas is calculated according to the methodology described in Refs. [42,43]. Calculations are based on the fuel composition according to the equation (4) and originate from proximate and ultimate analysis of the fuel.

$$C + H + S + N + O + M + A = 1 \quad (4)$$

It is assumed that the proper combustion process of solid fuel occurs at the air exceed coefficient equals 1.8. Mentioned value refers to a practical approach to the research of solid fuel combustion and finds confirmation in other works [44,45]. Basic parameters of coal required in analytical calculations are presented in Table 2. The mentioned composition represents typical hard coal intended for automatic burners in a fraction of grain of 5–25 mm, which is currently available on the Polish market.

The temperature of exhaust gas is specified by the calculation of the real initial temperature of the combustion process [46]. This value is calculated from the calorimetric temperature of combustion with taking into account an excess air number which is equal to 1.8. Analytical calculations were prepared for the nominal power of the device for the composition of exhaust gases calculated before. The temperature at the inlet to the domain is equal to 850 °C. The stream of cooling water, which is flowing through the

**Table 2**  
Composition of fuel used in analytical calculations.

Parameter	Value
Fixed carbon - C (wt. %)	65.6%
Fixed moisture - M (wt. %)	12%
Oxygen - O (wt. %)	9.6%
Ash content - A (wt. %)	8%
Hydrogen - H (wt. %)	4%
Nitrogen - N (wt. %)	0.8%
Sulfur - S (wt. %)	0%

water jacket depends on the power of the heating boiler. Mass flow of water required to receive the desired heating power is defined according to the equation (5).

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \Delta t} \tag{5}$$

The temperature of water at the inlet to the domain depends on the load and size of the installation receiving a generated heat. This value, in this case, is assumed as 60 °C.

Mass flow of exhaust gas and water through the heat exchanging chamber in the analyzed construction of the heating boiler is showed in Table 3. Nominal heating power  $\dot{Q}$  is defined for a construction equipped with vortex generators, which are mounted in every tube forming the heating boiler draughts. Vortex generators increase the heat transfer coefficient in the mentioned area. Prepared CFD analysis does not include vortex generators in the domain because of limited available computing power. Therefore obtained heat load in the domain will be lower than measured in the experiment.

In the analysis of the result, two additional parameters are used. The first physical quantity is the magnitude of flue gas which is flowing through the first draught. It is defined as a product of velocity and density according to the definition (6).

$$\dot{m}_{eg, D_1} = F \cdot u_{eg, D_1} \cdot \rho_{eg, D_1} \tag{6}$$

The second value is a relative mass flow through the tubes located in the first draught which was defined according to the equation (7).

$$\Gamma_{in, D_1} = \frac{\dot{m}_{eg, R_x D_1}}{\dot{m}_{eg, out}} \cdot 100\% \tag{7}$$

The mentioned value allows for showing what part of exhausts flows to the afterburning chamber with the omission of the first two draughts.

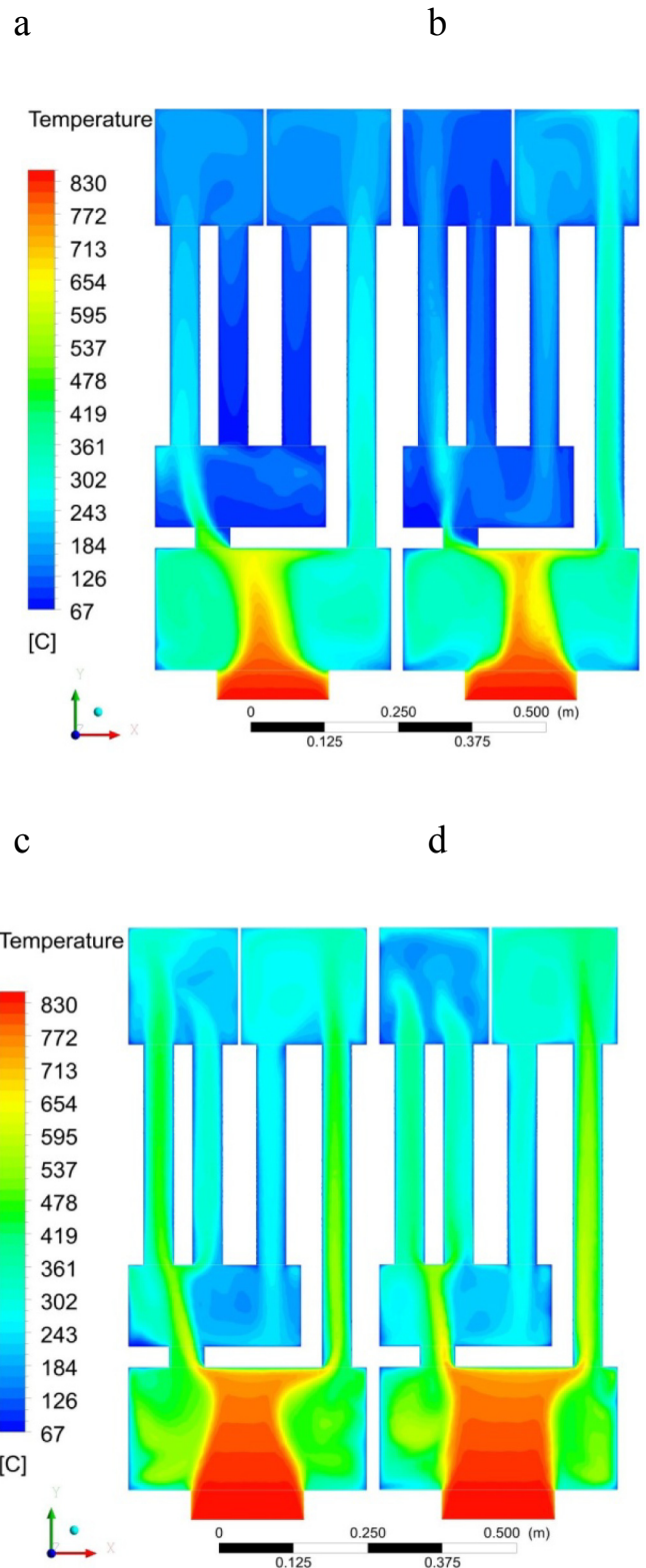
#### 4. Results and discussion

Fig. 4 shows the temperature distribution of exhaust gas in the heating boiler for two analyzed levels of the heat load in the XY plane according to Fig. 3. The mentioned plane allows for showing differences of flow for all analyzed cases between free and limited stream which is directed to the afterburning chamber. Crucial parameters connected with the heating boiler work for all analyzed cases are collected in Table 4.

During the work with the nominal power, the limitation of flue gas flow into the afterburning chamber caused the reduction of temperature of exhaust gas at the outlet by 7 °C. It is caused by a flow path extension for a higher mass flow of fumes through the first and second draught. It is connected with a greater magnitude of convective heat transfer caused by a higher velocity of flue gas, which has a tremendous impact on the Reynolds number and in consequence for the Nusselt number in the mentioned area. The temperature difference between analyzed cases at the outlet from the domain has an impact on increasing heating power by 4.2%. Limitation of exhaust gasses flow into the afterburning chamber

**Table 3**  
Streams of working mediums at the inlet to the domain.

$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{m}_{eg}$ (kg/s)	$\dot{m}_w$ (kg/s)
6	0.006	0.165
18	0.02	0.55



**Fig. 4.** Temperature distribution of flue gas in the XY plane, a) unhampered flow for 30% of nominal power, b) limited flow for 30% of nominal power, c) unhampered flow for 100% of nominal power, d) limited flow for 100% of nominal power.

**Table 4**  
Crucial parameters for exhaust gas flow through the heating boiler.

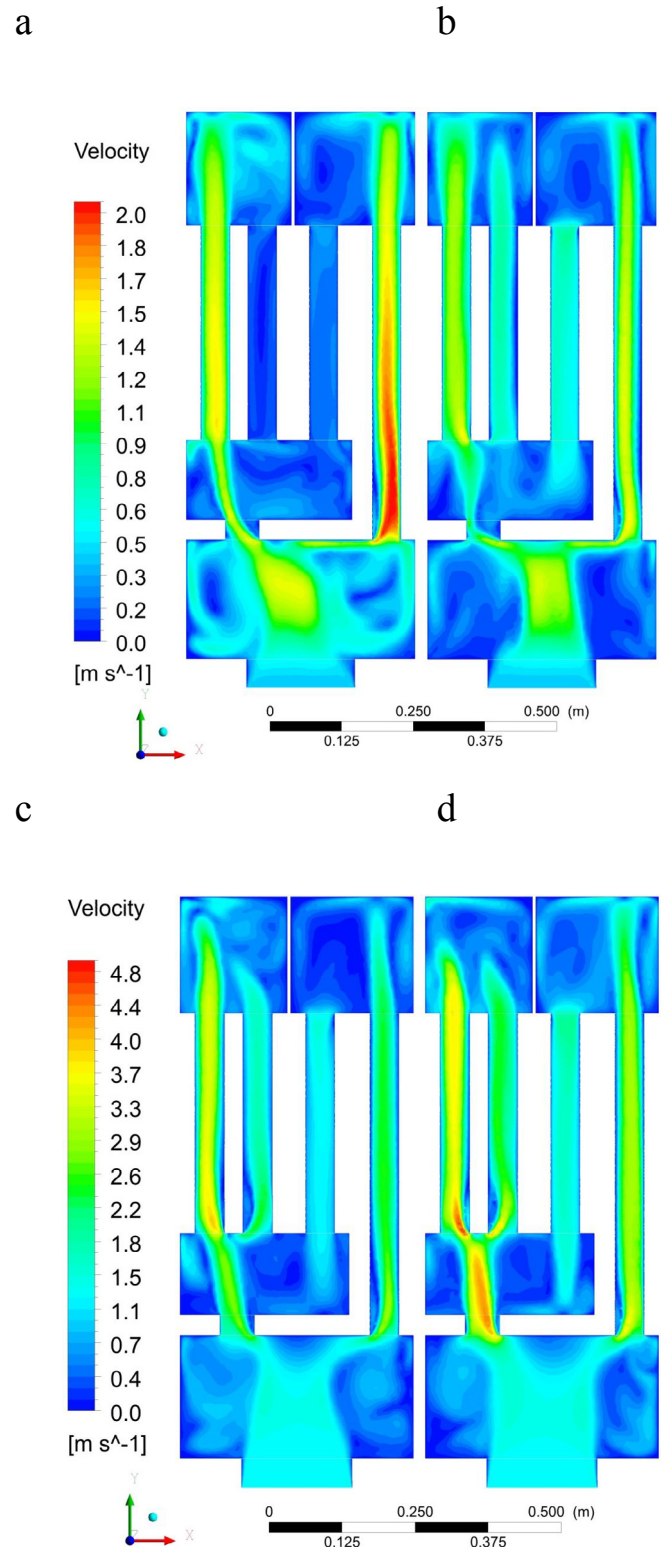
$P_n$ (%)	30%		100%	
	a	b	a	b
$t_{eg,out}$ (°C)	138	107	228	221
$u_{max,eg}$ (m/s)	2.0	2.1	4.1	5.3
$p_d$ (Pa)	2.82	2.62	7.63	12.2
$\dot{Q}$ (kW)	4.7	4.7	11.8	12.3

has a bigger impact on the temperature at the outlet from the domain in cases when the heat load is equal 30% of nominal power. Then it comes to degreasing of temperature at the outlet from the domain by 30 °C without visible changes in the heating power.

Velocity distribution obtained for analyzed cases located on the plane mentioned earlier is presented in Fig. 5. Obtained results for cases when flow through the duct 7 is free, inform that the whole stream of exhausts realized through directly to the afterburning chamber is performed by the left row of pipes of the last draught. This phenomenon is also confirmed in the analysis prepared for the definition of mass flow of flue gas in each tube of the third draught. The mentioned results are shown in Table 5. Collected data shows that independently from analyzed cases obtained for a lower stream of exhaust in a domain, in the part of the last draught reversed flow is occurring. Limitation of fumes flow into the afterburning chamber cause higher homogeneity of the exhaust gas stream in this area and reduces the temperature at the outlet of the domain. Obtained the same level of heating power for two analyzed cases is connected with increased exhaust cooling in the first two draughts for unhampered flow and direction of the higher stream of fumes back to the afterburning chamber.

When the heating boiler works with the nominal power, the phenomenon of reversed flow does not occur. It is connected with a higher mass flow of exhaust gas which has a big impact on pressure distribution in the third draught. However higher stream of fumes flows through pipes located in the central part of the boiler, which is the shortest way to the outlet in conjunction with low pressure of exhausts in this area. Limitation of exhaust gas flows through the duct connecting the combustion chamber with the afterburning chamber when heating boiler work with the nominal power also leads to higher homogeneity of the stream in every pipe creating the third draught. However higher stream of exhausts is still directed through the left line of pipes. The dominating impact for that phenomenon in both cases has eddy creation between connections with second and third draught in the area of the afterburning chamber.

Limitation of exhaust flow into the afterburning chamber changes the direction of the bigger stream of exhausts to the first and second draught of the boiler. Then a higher temperature of flue gas is present in this area. Increasing the temperature difference between working mediums cause the rising amount of heat transferred between working mediums. Also, a big impact on that phenomenon has the increased velocity of a flow according to the Reynolds number. Restriction of the flue gas flow to the afterburning chamber does not cause intense changes in maximum velocity for lower analyzed heat load of the heating device. In connection to the above does not come to an increase of a pressure drop in the domain. When the heating boiler works with the nominal power, limitation of a cross-section of duct 7 causes an increase of maximum velocity of exhaust gas by 30%, which results in additional pressure drop of the flue stream. Pressure drop increment after the limitation of fumes flow is increased by 4.6 Pa which is equal to 60% more than in cases when exhaust flow is unhampered.



**Fig. 5.** Velocity distribution of flue gas in the XY plane, a) unhampered flow for 30% of nominal power, b) limited flow for 30% of nominal power, c) unhampered flow for 100% of nominal power, d) limited flow for 100% of nominal power.

Fig. 6 shows an amount of exhaust flow through the first draught on the YZ plane (according to the scheme of the boiler) located in the cross-section of the first draught. The percentage of exhausts mass flow divided into respective tubes is presented in

**Table 5**  
Distribution of mass flow obtained for each pipe in the third draught.

$P_n$ (%)	30%			
case	a		b	
row	line			
	C1	C2	C1	C2
R1	30.8%	-7.3%	-6.0%	-5.3%
R2	34.7%	-6.6%	-6.0%	14.7%
R3	36.8%	-5.1%	34.6%	20.9%
R4	23.6%	-6.9%	30.8%	16.3%
$P_n$ (%)	100%			
row	column			
	C1	C2	C1	C2
R1	10.7%	8.1%	7.9%	7.6%
R2	17.5%	11.4%	11.9%	10.7%
R3	18.0%	11.5%	21.1%	14.6%
R4	13.0%	9.7%	14.1%	12.0%

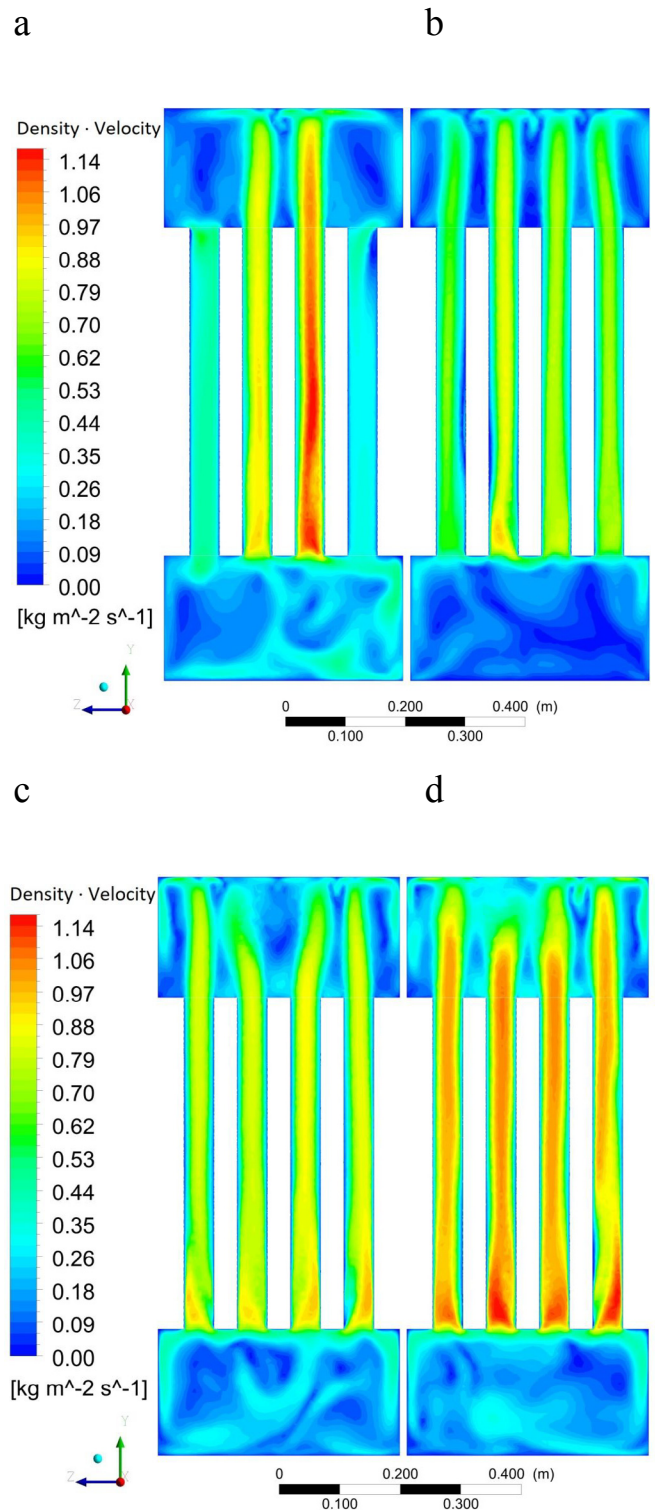
**Table 6.** Mentioned value is obtained by division of mass flow for each tube of mentioned draught divided by the total mass flow of exhaust gas flow at the outlet from the domain. The character of flow through the first draught for the unhampered flow is much different depending on the heat load of the heating device. When the boiler works with the minimal level of the heat load exhausts are directed to the reversing chamber which connects first and second draught only by two internal two tubes of the first draught. Two external pipes are responsible for occurring of reversed flow which directs fumes back to the combustion chamber. It is caused by eddies generated inside the reversing chamber, located above to the outlet from external pipes in the first draught. Then only 31.4% of exhaust flows through the first draught. Restriction of flow to the afterburning chamber caused that almost 90% of exhaust gas flow through this part. A higher amount of exhaust gas is received equally by all ducts located in the mentioned area. The combustion process for the minimal power of the heating device does not generate a large amount of exhaust gas stream. A limited amount of exhausts could easily move through the available space in the first draught equally filling each duct. Then do not come to the pressure drop increases.

When the heating boiler operates with the nominal power a higher volume of exhausts is present in the domain. It is connected with a higher partial pressure of elementary compounds of exhaust gas. The effects are highly visible in the resistance of flow according to the Bernoulli equation. Limitation of exhaust gases flows through the duct connecting the combustion chamber with the afterburning chamber causes, that about 37% of fumes are transported through the first draught of the heating boiler. The distribution of exhaust gas in each of the four pipes is uniform. The limitation of a flow to the afterburning chamber caused a higher stream of fumes has to appear in the first draught. Then 51% of the overall stream of exhaust gas flows through this area. It is the main reason for the increased pressure drop in the domain.

## 5. Conclusions

Small heating boilers used in the domestic applications work in a wide range of heat load. For the most part of the year, boilers work with the heating power close to 30% of the nominal heat load.

The character of a flue gas flow through the heat exchanger chamber strongly depends on the heat load of the heating device according to the number of exhausts present in the domain. The amount of fumes in the heat exchanger chamber has the main



**Fig. 6.** Distribution of amount of exhaust flow through the first draught a) unhampered flow for 30% of nominal power, b) limited flow for 30% of nominal power, c) unhampered flow for 100% of nominal power, d) limited flow for 100% of nominal power.

influence on a pressure drop of exhaust gas between the combustion chamber and the flue of the boiler. It also affects the eddy generation in the domain, which has to dominate influence for irregular character of flow between each tubes forming heating

**Table 6**  
Distribution of exhaust mass flow obtained for each pipe in the first draught referred to mass flow at the outlet from the domain.

P <sub>n</sub> (%)	30%		100%	
	case			
	a	b	c	d
R1	−16.1%	18.6%	8.9%	12.6%
R2	28.1%	25.2%	9.1%	13.3%
R3	31.5%	22.5%	9.7%	13.1%
R4	−12.0%	21.4%	9.1%	12.3%

boiler draughts.

Appropriate division of exhaust gases stream between ducts of the heating boiler allows achieving optimal parameters of flow for each level of the heat load. Implementation of a regulation system responsible for controlling of amount of exhaust gas developed into the afterburning chamber allows us to achieve fractional influence for a pressure drop with preserving of the high efficiency of heating boiler work, depends on the heat load of the heating device.

### Declaration of competing interest

The authors report no conflicts of interest. The authors alone are responsible for the content and writing of this article.

### Acknowledgments

The research was financed by the Poznan University of Technology financial resources for the statutory activity. The number of project: 05/56/DSPB/5135.

### References

- [1] Stala-Szlugaj K. Trends in the consumption of hard coal in Polish households compared to EU households. *Miner Resour Manag* 2016;32:5–22. <https://doi.org/10.1515/gospo-2016-0024>.
- [2] Kerimray A, Rojas-Solórzano L, Amouei Torkmahalleh M, Hopke PK, Ó Gallachóir BP. Coal use for residential heating: patterns, health implications and lessons learned. *Energy Sustain Dev* 2017;40:19–30. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.05.005>.
- [3] Commission Regulation (EU). 2015/1189 - of 28 April 2015 - implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers. 2015.
- [4] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. 2009.
- [5] Zhang X, Yuan J, Chen Z, Tian Z, Wang J. A dynamic heat transfer model to estimate the flue gas temperature in the horizontal flue of the coal-fired utility boiler. *Appl Therm Eng* 2018;135:368–78. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.067>.
- [6] Yang J-H, Kim J-EA, Hong J, Kim M, Ryu C, Kim YJ, et al. Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design. *Fuel* 2015;144:145–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.017>.
- [7] Laubscher R, Rousseau P. Numerical investigation into the effect of burner swirl direction on furnace and superheater heat absorption for a 620 MWe opposing wall-fired pulverized coal boiler. *Int J Heat Mass Tran* 2019;506–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.150>.
- [8] Madejski P. Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method. *Appl Therm Eng* 2018;145:352–63. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.004>.
- [9] Wang H, Zhang C, Liu X. Heat transfer calculation methods in three-dimensional CFD model for pulverized coal-fired boilers. *Appl Therm Eng* 2019;114633. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114633>.
- [10] Maakala V, Järvinen M, Vuorinen V. Optimizing the heat transfer performance of the recovery boiler superheaters using simulated annealing, surrogate modeling, and computational fluid dynamics. *Energy* 2018;160:361–77. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.002>.
- [11] Madejski P, Taler D, Taler J. Modeling of transient operation of steam superheater in CFB boiler. *Energy* 2019;182:965–74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.093>.
- [12] Taler D, Taler J. Simplified analysis of radiation heat exchange in boiler superheaters. *Heat Tran Eng* 2009;30:661–9. <https://doi.org/10.1080/01457630802659953>.
- [13] Taler J, Taler D, Kaczmarek K, Dzierwa P, Trojan M, Sobota T. Monitoring of thermal stresses in pressure components based on the wall temperature measurement. *Energy* 2018;160:500–19. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.010>.
- [14] Blaszcuk A, Pogorzelec M, Shimizu T. Heat transfer characteristics in a large-scale bubbling fluidized bed with immersed horizontal tube bundles. *Energy* 2018;162:10–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.008>.
- [15] Blaszcuk A, Nowak W. The impact of bed temperature on heat transfer characteristic between fluidized bed and vertical rifled tubes. *J Therm Sci* 2016;25:476–83. <https://doi.org/10.1007/s11630-016-0887-2>.
- [16] Rajh B, Yin C, Samec N, Hribersek M, Kokalj F, Zdravec M. Advanced CFD modelling of air and recycled flue gas staging in a waste wood-fired grate boiler for higher combustion efficiency and greater environmental benefits. *J Environ Manag* 2018;218:200–8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.030>.
- [17] Bermúdez CA, Porteiro J, Varela LG, Chapela S, Patiño D. Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace. *Fuel Process Technol* 2020;198. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106219>.
- [18] Gu J, Zhang Y, Wu Y, Li Z, Tang G, Wang Q, et al. Numerical study of flow and heat transfer of supercritical water in rifled tubes heated by one side. *Appl Therm Eng* 2018;142:610–21. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.017>.
- [19] Li Z, Wu Y, Tang G, Zhang D, Lu J. Comparison between heat transfer to supercritical water in a smooth tube and in an internally ribbed tube. *Int J Heat Mass Tran* 2015;84:529–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.047>.
- [20] Barma MC, Saidur R, Rahman SMA, Alouhi A, Akash BA, Sait SM. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;79:970–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>.
- [21] Gómez MAA, Martín R, Chapela S, Porteiro J. Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: an application to the study of the exhaust gas recirculation performance. *Energy Convers Manag* 2019;179:91–103. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.052>.
- [22] Gómez MA, Porteiro J, Patiño D, Míguez JL. Fast-solving thermally thick model of biomass particles embedded in a CFD code for the simulation of fixed-bed burners. *Energy Convers Manag* 2015;105:30–44. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.059>.
- [23] Gómez MA, Porteiro J, de la Cuesta D, Patiño D, Míguez JL. Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel* 2016;184:987–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.082>.
- [24] Chapela S, Porteiro J, Gómez MA, Patiño D, Míguez JL. Comprehensive CFD modeling of the ash deposition in a biomass packed bed burner. *Fuel* 2018;234:1099–122. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.121>.
- [25] Scharler R, Gruber T, Ehrenhöfer A, Kelz J, Bardar RM, Bauer T, et al. Transient CFD simulation of wood log combustion in stoves. *Renew Energy* 2020;145:651–62. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.053>.
- [26] Wiese J, Wissing F, Höhner D, Wirtz S, Scherer V, Ley U, et al. DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove. *Fuel Process Technol* 2016;152:223–39. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.005>.
- [27] Chaney J, Liu H, Li J. An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach. *Energy Convers Manag* 2012;63:149–56. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.036>.
- [28] Khodaei H, Al-Abdeli YM, Guzzomi F, Yeoh GH. An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. *Energy* 2015;88:946–72. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.099>.
- [29] Nosek R, Jandacka J, Szlek A. Transaction on mechanical power and process simulation of coal combustion in small boiler. *Global J Technol Optim* 2011;2:121–9.
- [30] Ryfa A, Buczynski R, Chabinski M, Szlek A, Bialecki RA. Decoupled numerical simulation of a solid fuel fired retort boiler. *Appl Therm Eng* 2014;73:794–804. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.029>.
- [31] Buczynski RB, Weber R, Szlek A, Nosek R. Time-dependent combustion of solid fuels in a fixed-bed: measurements and mathematical modeling. *Energy Fuels* 2012;26:4767–74. <https://doi.org/10.1021/ef300676r>.
- [32] Athanasios N, Nikolaos N, Nikolaos M, Panagiotis G, Kakaras E. Optimization of a log wood boiler through CFD simulation methods. *Fuel Process Technol* 2015;137:75–92. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.010>.
- [33] Morán JC, Tabarés JL, Granada E, Porteiro J, López González LM. Effect of different configurations on small pellet combustion systems. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2006;28:1135–48. <https://doi.org/10.1080/009083190910505>.
- [34] Urbaniak R, Bartoszewicz J, Judt W. Analysis of the possibilities of application of numerical methods in the improvement of the operating efficiency of low-power boilers. *Heat Tran Res* 2018;49:675–83. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2018019827>.
- [35] Rezeau A, Díez LI, Royo J, Díaz-Ramírez M. Efficient diagnosis of grate-fired biomass boilers by a simplified CFD-based approach. *Fuel Process Technol* 2018;171:318–29. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.024>.
- [36] Judt W, Bartoszewicz J. Analysis of fluid flow and heat transfer phenomenon in a modular heat exchanger. *Heat Tran Eng* 2019;1–14. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1699291>. in press.
- [37] Ziegler B, Mosiężny J, Czyżewski P. Unsteady CHT analysis of a solid state,


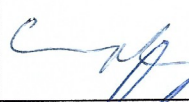
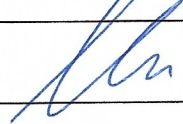


- sensible heat storage for PHES system. *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow* 2019. <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2018-0701>.
- [38] Joachimiak M, Joachimiak D, Ciałkowski M, Mądziński L, Okoniewicz P, Ostrowska K. Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in the heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem. *Int J Therm Sci* 2019;145. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105985>.
- [39] Jones FE, Harris GL. ITS-90 density of water formulation for volumetric standards calibration. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2012;97:335–40. <https://doi.org/10.6028/jres.097.013>.
- [40] Barichello LB, Siewert CE. A discrete-ordinates solution for a non-grey model with complete frequency redistribution. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 1999;62:665–75. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(98\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(98)00096-X).
- [41] Wilcox DC. Formulation of the  $k-\omega$  turbulence model revisited. *AIAA J* 2008;46:2823–38. <https://doi.org/10.2514/1.36541>.
- [42] Tulińska E. *Technical thermodynamics*. Warszawa: National Scientific Publishing; 1978.
- [43] Pudlik W. *Thermodynamic*. third ed. Gdańsk: Gdansk University of Technology Publishing House; 2011.
- [44] Junga R, Wzorek M, Kaszubska M. Technical and environmental performance of 10 kW understocker boiler during combustion of biomass and conventional fuels. *E3S Web Conf* 2017;19:01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171901009>.
- [45] Polák M, Neuberger P. *The optimisation of biomass combustion*. *Infrastruct Ecol Rural Areas* 2008:63–70.
- [46] de Souza-Santos ML. *Solid fuels combustion and gasification: modeling, simulation, and equipment operations*. second ed. CRC Press; 2010. <https://doi.org/10.1201/9781420047509>.

Poznań, 16.06.2020

**Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w postanie publikacji naukowej**

Wojciech Judt, Bartosz Ciupek, Rafał Urbaniak, Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber, Energy - 2020, vol. 196, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117093

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	Wojciech Judt	Przegląd literatury, przygotowanie siatki obliczeniowej, realizacja obliczeń numerycznych, redakcja tekstu publikacji, przygotowanie rysunków i tabel.	85%	
2.	Bartosz Ciupek	Zebranie danych wejściowych koniecznych do przygotowania warunków brzegowych w modelu.	10%	
3.	Rafał Urbaniak	Wsparcie merytoryczne, wsparcie dotyczące syntezy rezultatów.	5%	

## ***Study on hard coal combustion in heating boilers equipped with a steam-fed afterburning chamber***

# **Badanie procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych wyposażonych w parową komorę dopalania**

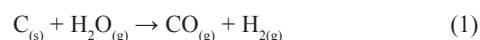
DOI: 10.15199/62.2020.8.9

*Solid fuel boiler with the nominal heating power 18 kW was fired with black coal only or with addn. of max. 3.6 kg/h steam to combustion or afterburning chambers. The steam addn. to the combustion chamber resulted in a decrease of particulate matter content with a small decrease in  $\text{NO}_x$  concn. and a large increase in CO content in the exhaust gas, while steam addn. to the afterburning chamber resulted in a decrease of particulate matter content with a slight decrease in emission of CO and  $\text{NO}_x$ .*

Zbadano wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego w kotle grzewczym wyposażonym w klasyczną komorę spalania oraz znajdującą się nad nią komorę dopalającą ze swobodnym przenikaniem do niej gazów spalinowych i płomienia na proces spalania. W trakcie badań mierzono zmiany emisji substancji szkodliwych oraz parametry termodynamiczne procesu spalania. Strumień masy doprowadzonej do komory spalania pary wodnej wynosił maksymalnie 3,6 kg/h, co wynikało z nominalnych parametrów technicznych parownicy użytej w badaniach (objętość oraz moc wytwórcza pary wodnej). Dzięki otrzymanym wynikom pokazano, że para wodna doprowadzona do komory spalania kotła

grzewczego małej mocy znacząco wpłynęła na zmianę składu chemicznego spalin. Doprowadzenie pary wodnej do komory spalania spowodowało obniżenie stężeń masowych emitowanych pyłów (PM) i tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) oraz wielokrotny wzrost stężenia masowego emitowanego tlenku węgla(II). W przypadku doprowadzenia do komory dopalającej pary wodnej otrzymano, podobnie jak w przypadku komory spalania, znaczący spadek emisji PM i nieznaczny  $\text{NO}_x$  przy zachowaniu zbliżonej emisji CO względem normalnej pracy urządzenia. Kocioł grzewczy o mocy nominalnej 18 kW był tak wyregulowany, aby pracować w sposób ciągły z mocą ok. 5,5 kW, co stanowiło ok. 30% względem mocy znamionowej. Przedział ten odzwierciedla rzeczywisty przedział mocy, z jaką kotły grzewcze na paliwa stałe pracują w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Mierzono także temperaturę panującą w komorze spalania i dopalania, temperaturę spalin i zawartość tlenu w spalinach. Na podstawie otrzymanych wyników wyliczono współczynnik nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ).

Badania nad zmianą jakości procesu spalania w kotłach grzewczych małej mocy pod wpływem doprowadzonej pary wodnej są kontynuacją wcześniej realizowanych prac badawczych<sup>1, 2)</sup>. Dotychczas przeprowadzone badania dały zadowalające przesłanki dotyczące obniżenia emisji substancji szkodliwych generowanych przez kotły grzewcze na paliwa stałe zasilane węglem kamiennym. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań zaobserwowano znaczące obniżenie emisji pyłów (PM) oraz nieznaczne zmniejszenie emisji tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) przy jednoczesnym gwałtownym wzroście stężenia masowego emitowanego tlenku węgla(II). Wysoki poziom emisji tlenku węgla(II) oraz obecność wodoru ( $\text{H}_2$ ) w spalinach mogą wskazywać na to, że po dostarczeniu pary wodnej zaszła reakcja zgazowania węgla opisaną równaniem (1):

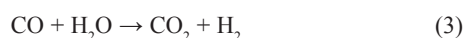


Mgr inż. Bartosz CIUPEK w roku 2017 ukończył studia na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Jest asystentem badawczym w Instytucie Energetyki Ciepłej tej uczelni. Specjalność – procesy spalania, wymiana ciepła.

\* Adres do korespondencji:

Instytut Energetyki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 665-22-14, GSM: +48 605-916-099, e-mail: bartosz.ciupek@put.poznan.pl

Na jej podstawie można wnioskować, że w wyniku doprowadzenia pary wodnej do komory spalania zachodzi proces tworzenia tlenku węgla(II) z węgla pierwiastkowego (np. w postaci sadzy) pod wpływem pary wodnej, a to powoduje obniżenie ilości emitowanych PM przy jednoczesnym wzroście ilości emitowanego CO. Oznacza to, że doprowadzenie dodatkowego czynnika termodynamicznego do komory spalania powoduje reorganizację procesu spalania. Jednym z efektów pogorszenia jakości procesu spalania byłyby widoczne obniżenie ilości tlenu w spalinach, jednak w przypadku przeprowadzonych badań nie zaobserwowano zmian w ilości pozostałego po procesie spalania tlenu. Może to świadczyć o tym, że doprowadzona do komory spalania para nie zastąpiła tlenu, tylko stała się dodatkowym czynnikiem reagującym w procesie spalania. Innymi reakcjami chemicznymi, które mogą zachodzić w trakcie doprowadzania pary wodnej do komory spalania są reakcje (2) i (3):



Świadczyć o tym może znaczący wzrost ilości emitowanego tlenku węgla(II), którego emisja w porównaniu z normalną pracą kotła wzrasta nawet o 200% względem standardowej pracy paleniska, oraz detekcja w spalinach znacząco większego udziału wodoru względem standardowej pracy kotła<sup>2)</sup>. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w trakcie spalania węgla w kotłach grzewczych przy jednoczesnym doprowadzeniu pary wodnej do komory spalania, następuje wiele reakcji chemicznych, których wspólnym efektem jest widoczne obniżenie ilości emitowanych PM oraz jednoczesny wzrost emisji CO. Powstawanie CO w wyniku tych reakcji chemicznych można przyrównać do procesu powstawania gazu syntezowego (syngazu), który w dalszych etapach (np. w komorze dopalającej) może zostać przetworzony do substancji prostych z wydzieleniem energii. Rozszerzone informacje dotyczące spalania syngazów zawarte są w publikacjach<sup>3, 4)</sup>.

Alternatywą do prowadzonych badań może być przeprowadzenie procesu konwersji tlenku węgla, w którym znacznie zmniejszy się jego emisja poprzez utlenianie CO do CO<sub>2</sub>. Dzięki temu można uzyskać lepsze parametry wymiany ciepła pomiędzy spalinami i czynnikiem roboczym, co korzystnie wpłynie na sprawność urządzenia grzewczego. Zaobserwowano również, że doprowadzenie dodatkowych substancji chemicznych w obręb płomienia powoduje odebranie z niego części energii oraz obniżenie (nawet o ok. 250°C) temperatury panującej w komorze spalania<sup>2)</sup>. Obniżenie temperatury płomienia wpływa na pogorszenie procesu spalania, efektem tego jest zwiększona emisja tlenku węgla(II) przy jednoczesnym nieznacznym obniżeniu ilości emitowanych NO<sub>x</sub>. Przekazanie ciepła wytwarzanego w procesie spalania z płomienia do pary wodnej doprowadzanej do komory spalania ogranicza udział mechanizmu termicznego powstawania tlenków azotu, powodując niewielki spadek emisji NO<sub>x</sub>. Mechanizm ten w przypadku kotłów niskotemperaturowych spalających paliwa stałe ma niewielki wpływ na powstawanie tlenków azotu z procesu spalania, a główny udział leży po stronie mechanizmu paliwowego<sup>5)</sup>.

Skala problemu związana z emisją substancji szkodliwych generowanych w okresie grzewczym przez kotły na paliwa stałe mobilizuje do prowadzenia badań nad nowoczesnymi technologiami poprawiającymi właściwości ekologiczne kotłów. Badania nad aspektami środowiskowymi kotłów grzewczych na paliwa stałe są prowadzone wieloaspektowo<sup>6-7)</sup>. W większości prac kotły grzewcze jako obiekt badawczy są rozpatrywane w odniesieniu do termodynamiki procesu spalania z uwzględnieniem środowiskowych efektów ich eksploatacji<sup>8, 9)</sup>. Badania prowadzone przez kilka ostatnich lat pokazują, że kocioł grzewczy na paliwo stałe powinien być rozpatrywany jako zamknięty układ niejednorodny z silnym oddziaływaniem na środowisko zewnętrzne, zależnym od parametrów fizykochemicznych użytego paliwa<sup>10, 11)</sup>. Obecnie prowadzone badania w obrębie urządzeń energetycznych odnoszą się do wielokryterialnych aspektów numerycznego modelowania i obliczeń termodynamicznych<sup>12-14)</sup>. Doświadczenia te

pozwolą w przyszłości na rozbudowanie przeprowadzonych badań eksperymentalnych o część matematycznego modelowania procesów cieplnych zachodzących w kotle grzewczym.

Celem badań była analiza ciepłno-emisyjnej pracy kotła bez doprowadzanej pary wodnej oraz z parą wodną dodaną do komory spalania i komory dopalającej. Do badań wybrano krajowy węgiel kamienny, którego parametry fizykochemiczne wpływają w sposób znaczący na parametry termodynamiczne i emisyjne kotła<sup>1)</sup>.

## Część doświadczalna

### Materiały

Do badań zastosowano węgiel kamienny typu gazowo-płomienny w sortymencie groszek w stanie roboczym. Parametry fizykochemiczne paliwa zamieszczono w tabeli 1. Parę zastosowaną w bada-

Table 1. Technical parameters of fuel used in tests

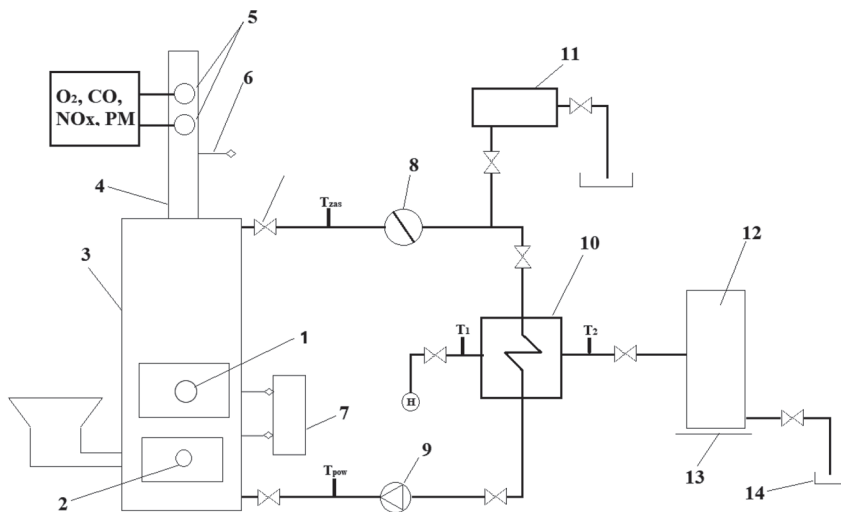
Tabela 1. Parametry techniczne paliwa użytego w badaniach

Wartość opałowa, MJ/kg	Zawartość, % mas.						
	wilgość	C	H	O <sub>2</sub>	N	S	popiół
28,5	9,5	87,1	3,3	4,5	1,5	0,6	8,0

niach wytwarzano w zaprojektowanej i skonstruowanej do tego celu parownicy. Para lekko przegrzana miała temp. 164–186°C, ciśnienie początkowe wtrysku wynosiło ok. 3,5 bar i malało do ok. 1,1 bar wraz z ubytkiem pary w zbiorniku. Wydatek pary z parownicy wynosił maksymalnie 3,6 kg/h i wynikał z parametrów technicznych wykorzystanego zbiornika i mocy grzewczej grzałki podgrzewającej wodę. Moc grzałki elektrycznej wynosiła 2 kW. Naczynie parownicy przed podjęciem badań przeszło pomyślnie niezbędne próby ciśnieniowe.

### Aparatura

Obiektem badawczym był prototypowy kocioł na paliwo stałe o mocy znamionowej 18 kW wyposażony w klasyczną komorę spalania oraz ułożoną nad nią komorę dopalającą. Komora spalania oraz komora dopalająca zostały połączone przez gardziel umożliwiającą swobodny przepływ gazów spalinowych. Kanał łączący obie komory został zabudowany materiałami ceramicznymi pozwalającymi na utrzymanie wysokiej temperatury przepływających spalin. Obie komory wyposażono w kolektory umożliwiające podpięcie złączy montażowych parownicy. Dodatkowo układ komory dopalającej wyposażono w system izolatorów ceramicznych utrzymujących wysoką temperaturę spalin w jej obrębie. Pomiaru zawartości O<sub>2</sub> w spalinach dokonano za pomocą analizatora spalin BCA-01. Jego zakres pomiarowy wynosił 0–25% obj. tlenu, a błąd pomiarowy ±0,8%. Pomiar stężeń masowych CO, NO<sub>x</sub> i H<sub>2</sub> wykonano analizatorem spalin Testo 350 XL, który był wyposażony w fotochemiczne cele pomiarowe. Czas analizy ustalono jako jedno próbkowanie na 5 s. To ustawienie wynikało z możliwości wystąpienia chwilowych wysokich stężeń CO (powyżej 5000 ppm). Dokładność pomiaru stężeń CO i H<sub>2</sub> wynosiła ±5%, a NO<sub>x</sub> ±3%. Do pomiaru stężenia masowego pyłu w spalinach wykorzystano pyłomierz grawimetryczny Testo 380. Dokładność pomiaru PM wynosiła ±5 mg/m<sup>3</sup>. Czas próbkowania pyłomierza również wynosił 5 s, co pozwoliło ujednolicić przebiegi emisji substancji szkodliwych z obu analizatorów. Czas poboru jednorazowej próbki spalin trwał 30 min. Do pomiaru temperatur wykorzystano termopary typu K (NiCr-Ni) o zakresie pomiarowym od –200°C do +1370°C i błędzie pomiarowym ±1°C w przedziale temp. 400–900°C. Strata ciepła w instalacji grzewczej wynosiła ok. ±2,5% strumienia entalpii paliwa. Odbiór ciepła wytworzonego w procesie spalania odbywał się przez układ płytowych wymienników ciepła. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



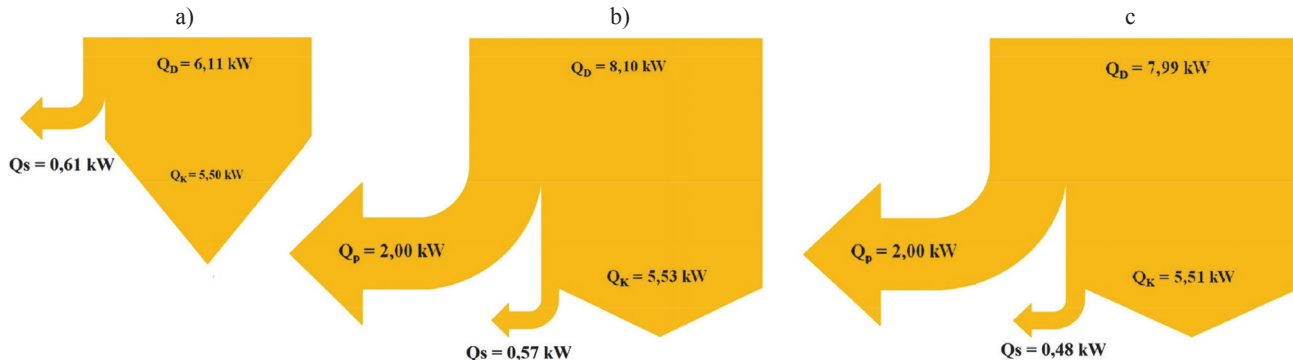
Opis: 1 – komora dopalania, 2 – komora spalania, 3 – kocioł grzewczy, 4 – komin pomiarowy, 5 – zespół analizatorów spalin do rejestracji CO, NO<sub>x</sub>, PM, O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>, 6 – pomiar temperatury spalin (termopary – 5 szt.), 7 – układ wytwarzania i doprowadzenia pary wodnej do KS i KD, 8 – przepływomierz (licznik energii), 9 – układ pomp obiegowych, 10 – układ płytowych wymienników ciepła, 11 – naczynie wyrównawcze, 12 – zbiornik wodny, 13 – waga, 14 – zrzut wody chłodzącej, T<sub>zas</sub> i T<sub>pow</sub> – pomiar temperatur kotła (bilans energii dużego obiegu), T<sub>1</sub> i T<sub>2</sub> – pomiar temperatur wody chłodzącej wymienniki ciepła (bilans energii małego obiegu)

Fig. 1. Scheme of the test stand

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

## Metodyka badań

Przeprowadzono pomiary dla 3 cykli badawczych. W pierwszym cyklu zbadano poziom emisji substancji szkodliwych dla kotła pracującego z mocą minimalną, opalanego w sposób automatyczny węglem



Opis: Q<sub>d</sub> – suma energii doprowadzonych do układu, Q<sub>s</sub> – energia tracona z układu (temp. spalin, promieniowanie powierzchni kotła), Q<sub>k</sub> – energia użyteczna kotła (moc kotła), Q<sub>p</sub> – energia pobierana przez parownicę do odparowania wody

Fig. 2. Sankey charts for each test cycles

Rys. 2. Wykresy Sankeya dla poszczególnych cykli badań

kamiennym. Otrzymane wyniki posłużyły jako dane wyjściowe informujące o poziomie emisji zanieczyszczeń z urządzenia. W kolejnym cyklu zbadano emisję substancji szkodliwych przy doprowadzaniu do komory spalania kotła pary wodnej w ilości ok. 3,6 kg/h w sposób periodyczny. W ostatnim cyklu przeprowadzono analogiczne badania jak w cyklu drugim, ale para wodna doprowadzana była do komory dopalającej kotła.

Dane pomiarowe rejestrowano na stanowisku badawczym wyposażonym w komputer PC oraz układ pomiarowy National Instruments. Komputer gromadził dane pomiarowe z analizatorów spalin, a układ pomiarowy wykonany w środowisku LabVIEW rejestrował temperatury. Stężenia masowe CO, NO<sub>x</sub> i PM przeliczono na mg/m<sup>3</sup> dla 10% O<sub>2</sub> w spali-

nach. Temperatura spalin (T<sub>sp</sub>) była średnią wartością z pomiaru wykonywanego przez 5 termopar znajdujących się w kominie pomiarowym. Temperatura w komorze spalania (T<sub>ks</sub>) była rejestrowana na głębokości ok. 30 cm od pokrywy przedniej kotła z ulokowanym czujnikiem w odległości ok. 10 cm od powierzchni paleniska. Temperatura w komorze dopalania (T<sub>kd</sub>) była rejestrowana w odległości ok. 10 cm poniżej strumienia wtryskiwanej pary. Zużycie paliwa przez kocioł określano poprzez pomiar masy wsadu paliwa przed badaniami i po skończonych badaniami. Na podstawie zużytego paliwa w czasie badań określano strumień masy spalanego paliwa. Obliczano współczynnik nadmiaru powietrza (λ) dla poszczególnego cyklu badań. Na rys. 2 podano wykresy Sankeya dla przeprowadzonych cykli badawczych. Na rys. 2a przedstawiono bilans cieplny dla normalnej pracy kotła bez dostarczania pary do komory spalania, a na rys. 2b i 2c przedstawiono bilanse cieplne dla próby z doprowadzeniem pary wodnej do komory spalania i komory dopalającej. W bilansach na rys. 2b i 2c uwzględniono energię 2 kW pobieraną przez układ wytwarzania pary wodnej, co pozwalało oszacować efekty energetyczne i ekonomiczne potencjalnego wdrożenia omawianej technologii.

## Wyniki badań

W trakcie pierwszego cyklu badań kocioł pracował w zakresie temperatury spalin 116–139°C. Wyniki badań dla pierwszego cyklu podano w tabeli 2. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg zmian temperatury i emisji substancji szkodliwych w trakcie normalnej pracy kotła.

Wyniki dla drugiego cyklu badań przedstawiono w tabeli 3. Przykładowy przebieg zmian temperatury i emisji substancji szkodliwych podczas doprowadzania pary wodnej do komory spalania przedstawiono na rys. 4. Na podstawie otrzymanych wyników zaobserwowano, że wprowadzenie pary wodnej do procesu spalania spowodowało wzrost ilości emitowanego CO o ok. 60%, emisja pyłów zmalała o ok. 18%, a emisja NO<sub>x</sub> spadła o ok. 4%. Wyniki te korespondowały z wcześniej otrzymanymi w badaniach<sup>2)</sup> doprowadzenia pary wodnej do

Table 2. Results of the first cycle test

Tabela 2. Wyniki pierwszego cyklu badań

Parametr	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>ks</sub> , °C	T <sub>sp</sub> , °C	λ
Średnia	12,53±0,10	516,11±3,60	479,23±2,40	112,65±5,00	772±1	130±1	2,55

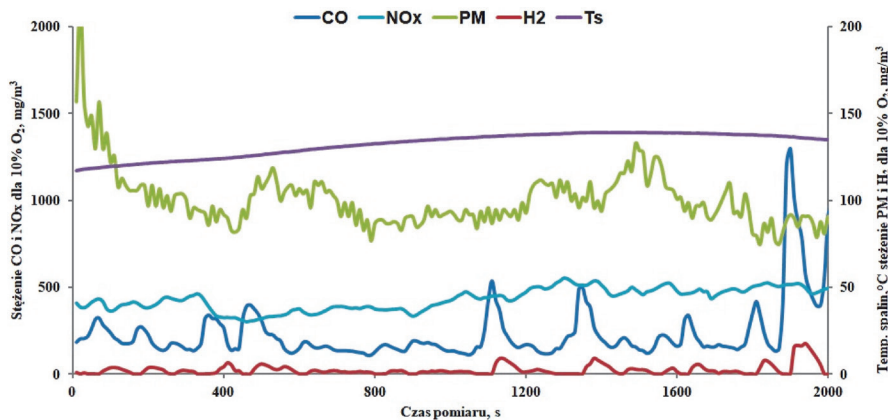


Fig. 3. The course of emissions and temperature for first cycle of study

Rys. 3. Zmiany w czasie emisji substancji szkodliwych i temperatury spalin w pierwszym cyklu badań

Table 3. Results of the second cycle test

Tabela 3. Wyniki drugiego cyklu badań

Parametr	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>KS</sub> , °C	T <sub>SP</sub> , °C	λ
Średnia	12,55±0,10	828,62±3,40	460,46±2,70	92,70±5,00	687±1	124±1	2,52

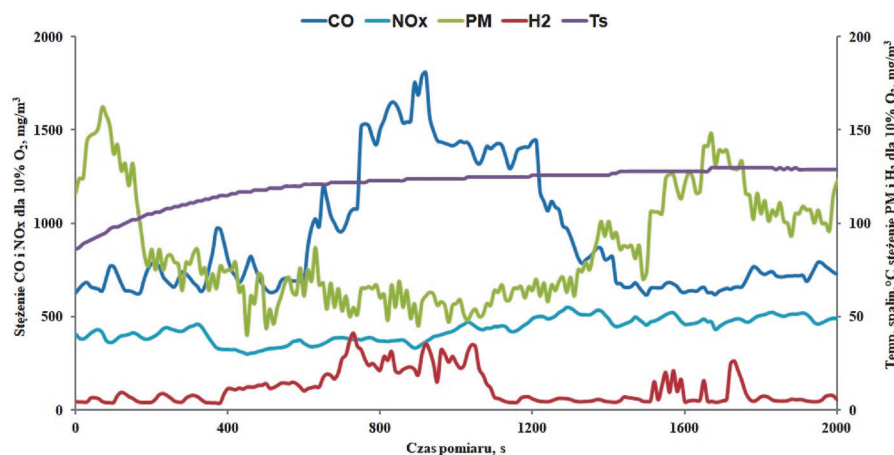


Fig. 4. The course of emissions and temperature for second cycle of study

Rys. 4. Zmiany w czasie emisji substancji szkodliwych i temperatury spalin w drugim cyklu badań

komory spalania kotła niespełniającego wymagań klas czystości spalin zgodnych z normą<sup>15)</sup>. W spalinach wykryto obecność wodoru (H<sub>2</sub>) w ilości 9,17 mg/m<sup>3</sup>. Z przebiegu krzywych wynikało, że w momencie wtrysnięcia pary wodnej do komory spalania nastąpiła intensyfikacja reakcji węgla z parą wodną oraz detekcja H<sub>2</sub> w spalinach. Ponadto gwałtownie wzrastała ilość emitowanego CO przy jednoczesnym spadku ilości emitowanych PM. W trakcie dostarczania pary wodnej do komory spalania zaobserwowano obniżenie temperatury spalin średnio o ok. 6°C oraz temperatury panującej w komorze spalania średnio o ok. 41°C, co nieznacznie zahamowało powstawanie NO<sub>x</sub> w procesach termicznych.

Wyniki dla trzeciego cyklu badań podano w tabeli 4. Przykładowy przebieg zmian temperatury i emisji substancji szkodliwych podczas

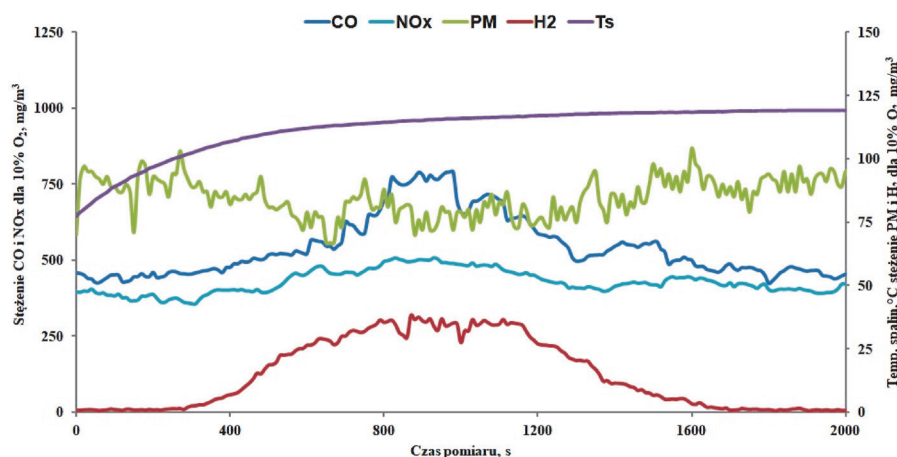
Fig. 5. The course of emissions and temperature for third cycle of study

Rys. 5. Zmiany w czasie emisji substancji szkodliwych i temperatury spalin w trzecim cyklu badań

Table 4. Results of the third cycle test

Tabela 4. Wyniki trzeciego cyklu badań

Parametr	O <sub>2</sub> , % obj.	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>	PM, mg/m <sup>3</sup>	T <sub>KD</sub> , °C	T <sub>SP</sub> , °C	λ
Średnia	12,17±0,10	506,50±3,10	445,97±2,50	88,39±5,00	515±1	114±1	2,39



doprowadzania pary wodnej do komory dopalającej przedstawiono na rys. 5. Zaobserwowano, że ilość emitowanego CO względem standardowego procesu spalania spadła o ok. 2%, co mieściło się w granicach błędów pomiarowych i pozwalało sądzić, że emisja tlenku węgla(II) względem normalnej pracy kotła nie zmieniła się. Wprowadzenie pary wodnej do procesu spalania spowodowało zmniejszenie emisji PM o ok. 22% i NO<sub>x</sub> o ok. 7%. względem emisji z pierwszego cyklu badań. W spalinach wykryto H<sub>2</sub> w ilości 9,75 mg/m<sup>3</sup>. Obecność wodoru w spalinach nie była wskazana, co może świadczyć o konieczności zwiększenia ilości doprowadzanego do komory dopalania utleniacza. Średnia temperatura spalin dla procesu spalania z dodaną parą wodną była niższa o 16°C.

Na rys. 6–8 przedstawiono rozkłady emisji: tlenku węgla(II), tlenków azotu oraz zapylenia spalin dla poszczególnych cykli badań. Na rys. 9 przedstawiono zestawienie emisji substancji szkodliwych dla poszczególnych cykli badań oraz graficzną prezentację różnic w emisji substancji szkodliwych dla poszczególnych cykli względem normalnej pracy kotła.

### Algorytm postępowania

Na podstawie analizy badań wykonano algorytm postępowania dla doprowadzenia pary mokrej do procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych małej mocy wyposażonych w komorę dopalającą. Zaobserwowano, że im większy był strumień masy pary wodnej doprowadzanej do procesu spalania, tym bardziej zwiększała się emisja CO (31–90%) względem standardowej pracy kotła. W przypadku PM następował gwałtowny spadek emisji (12–25%), a dla NO<sub>x</sub> emisja spadała nieznacznie (2–5%) w odniesieniu do normalnej pracy kotła. Efekt ten mógł wynikać z zajścia reakcji chemicznych (1)–(3), co potwierdzał gwałtowny wzrost emisji CO i H<sub>2</sub>.

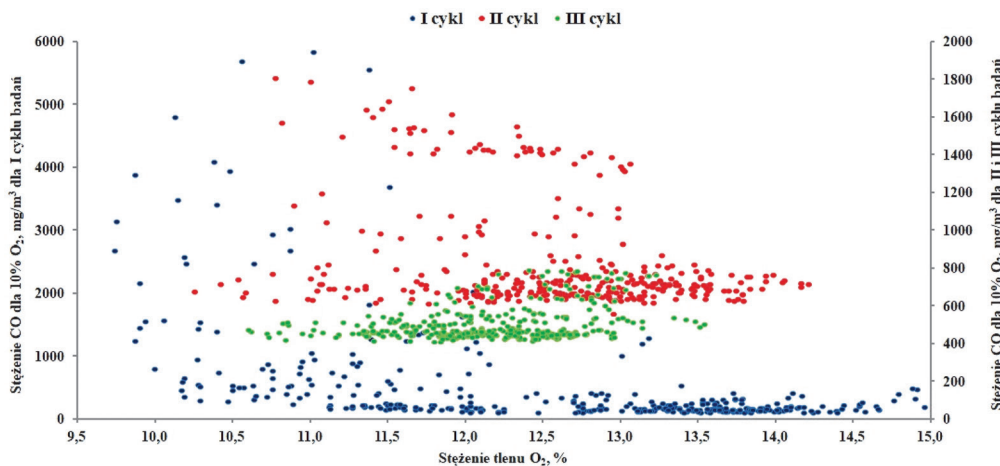


Fig. 6. Distribution of carbon monoxide emissions for test cycle I, II and III

Rys. 6. Rozkład emisji tlenku węgla(II) dla I, II i III cyklu badań

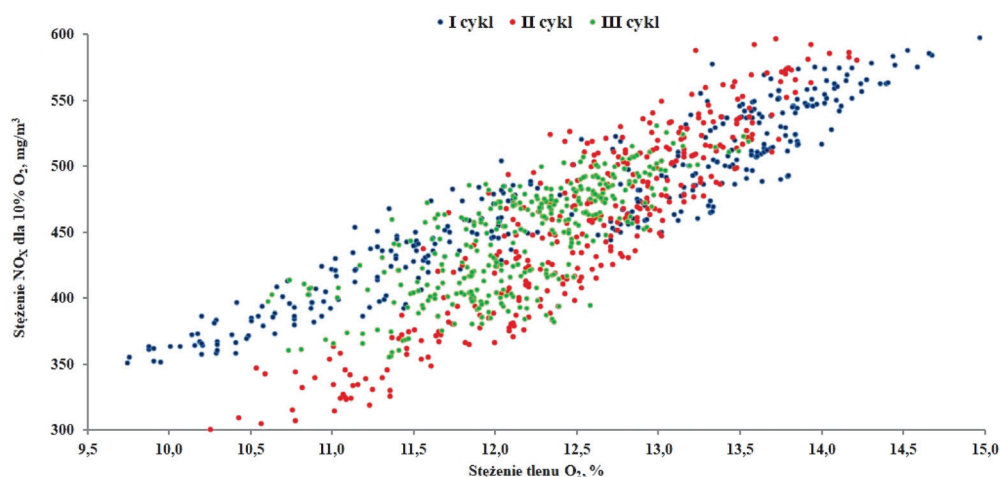


Fig. 7. Distribution of nitrogen oxides for test cycle I, II and III

Rys. 7. Rozkład emisji tlenków azotu dla I, II i III cyklu badań

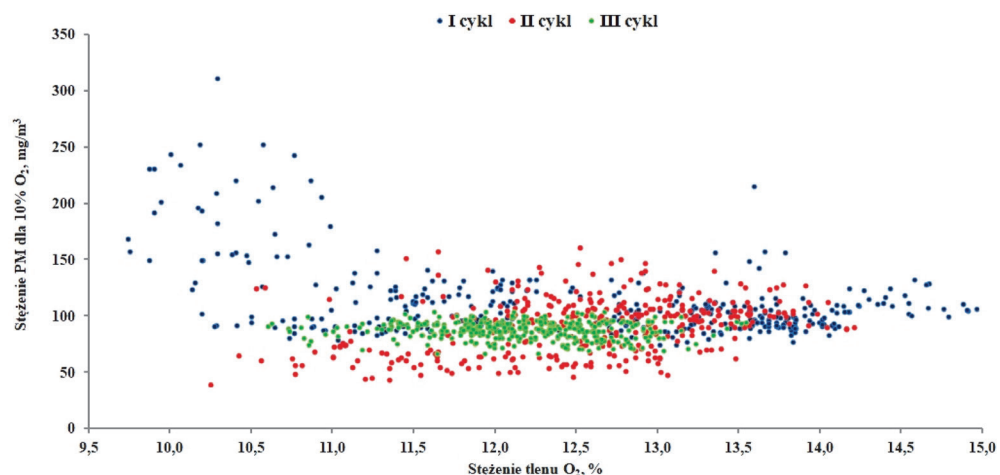


Fig. 8. Distribution of dust emissions for test cycle I, II and III

Rys. 8. Rozkład emisji pyłów dla I, II i III cyklu badań

W przypadku doprowadzenia pary wodnej do komory dopalającej nie obserwowano znaczącego wzrostu emisji CO, a otrzymywano korzystne obniżenie emisji PM (ok. 20%) oraz NO<sub>x</sub> (ok. 7%) względem standardowej pracy kotła.

Wyniki emisji dla kotła zaopatrzonego w dodatkową komorę dopalającą, pracującego z mocą stanowiącą 30% mocy znamionowej, aproksy-

nowano do rozkładów w funkcji kwadratowej. Pod wartością  $x$  w równaniach regresyjnych znajduje się procentowy udział tlenu w spalinach. Podstawiając odpowiednie wartości pozostałości tlenu w spalinach, możliwe było oszacowanie poziomu emisji poszczególnych substancji szkodliwych, wyrażone w mg/m<sup>3</sup>. Otrzymane funkcje oraz ich współczynniki korelacji ( $r$ ) i determinacji ( $R^2$ ) dla poszczególnych substancji szkodliwych, opracowane na podstawie kolejnych trzech cykli badań, przedstawiono w tabeli 5. Z otrzymanych równań regresji wynika, że największe skorelowanie funkcji z otrzymanymi wynikami uzyskano dla emisji NO<sub>x</sub>, a najmniejsze dla PM i CO. Było to związane z silnie niestacjonarnym i niejednorodnym charakterem emisji tlenku węgla(II) oraz sadzy wchodzącej w skład PM, co potwierdzało wpływ wielu mechanizmów na emisję tych substancji.

Na podstawie przeprowadzonych testów określono przybliżone zalecenia co do parametrów doprowadzanej pary wodnej. W przypadku doprowadzenia pary wodnej do komory spalania zalecono utrzymywanie strumienia pary wodnej na maksymalnym poziomie 3,2–3,6 m<sup>3</sup>/h dla zawartości tlenu w spalinach poniżej 10,5%. Przy doprowadzaniu pary wodnej do komory dopalającej zalecono utrzymanie strumienia pary wodnej na maksymalnym poziomie 3,0–3,6 m<sup>3</sup>/h dla zawartości tlenu w spalinach poniżej 11,5%. W celu utrzymania stałych parametrów pracy kotła zalecono zastosowanie analizatora jakości procesu spalania współpracującego z regulatorem pracy kotła i dobierającego odpowiednie nastawy kotła, wynikające z chwilowych obciążeń cieplnych. Ponadto zaobserwowano, że im mniejszy był strumień pary doprowadzonej do komory spalania, tym mniejsza była intensyfikacja powstawania tlenku węgla(II), ale i mniejszy stopień obniżenia emisji PM.

Uzyskane wyniki oraz równania regresji mogą zostać wykorzystane przy realizacji podobnych badań lub w prowadzeniu prac nad rozwojem nowych konstrukcji kotłów grzewczych zasilanych paliwami stałymi.

## Podsumowanie

Przeprowadzono badania nad wpływem dostarczania pary wodnej do procesu spalania w kotle grzewczym zaopatrzonym w komorę dopalającą substancje szkodliwe. Para wodna była dostarczana zarówno do komory spalania, jak i do komory dopalającej. Przeprowadzone badania potwierdziły, że doprowadzenie pary wodnej w obręb komory spalania powoduje spadek emisji PM oraz wzrost emisji CO. W przypadku emisji tlenków azotu nie zaobserwowano znaczącej zmiany ich udziałów masowych w spalinach. Dodanie pary wodnej do

### Zestawienie emisji sub. szkodliwych

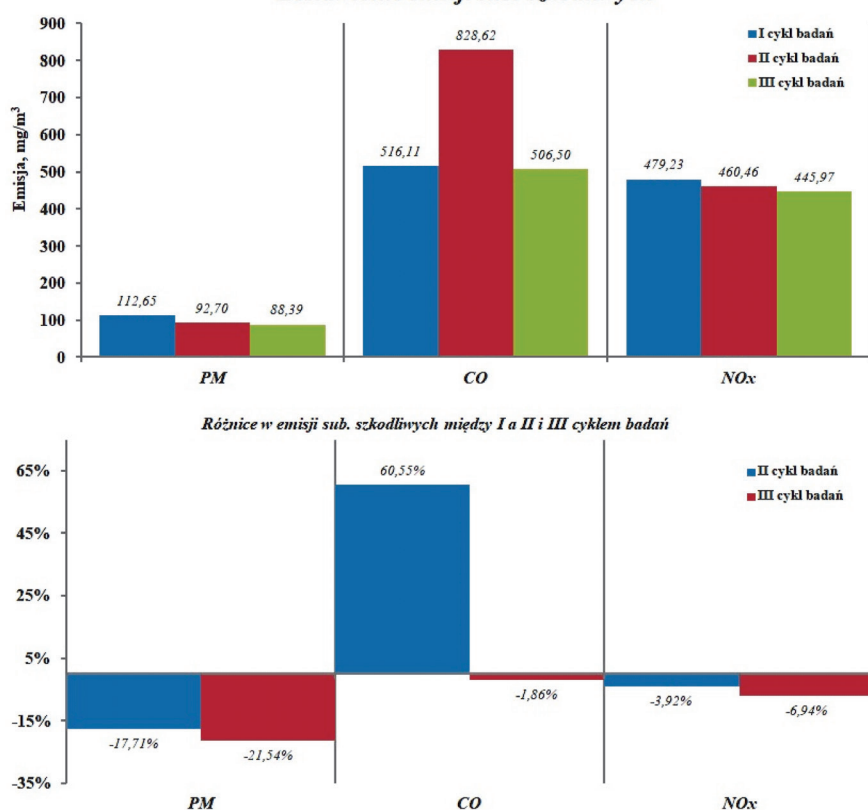


Fig. 9. Change in emissions of harmful substances for test cycle II and III relative to test cycle I

Rys. 9. Zmiana emisji substancji szkodliwych dla II i III cyklu badań względem I cyklu badań

Table 5. Functions describing the emission of harmful components for the boiler with an additional afterburning chamber

Tabela 5. Funkcje opisujące emisję szkodliwych składników dla kotła z dodatkową komorą dopalającą

Cykl badań	Funkcja		
	CO	NO <sub>x</sub>	PM
I	$232x^2 - 6062x + 39652$ $r = -0,63; R^2 = 0,47$	$2x^2 - 18x + 295$ $r = 0,93; R^2 = 0,89$	$8x^2 - 211x + 1468$ $r = -0,62; R^2 = 0,34$
II	$-8x^2 + 97x + 799$ $r = -0,25; R^2 = 0,09$	$2x^2 + 23x - 198$ $r = 0,91; R^2 = 0,82$	$-2x^2 + 71x - 413$ $r = 0,35; R^2 = 0,33$
III	$34x^2 - 747x + 4601$ $r = 0,58; R^2 = 0,21$	$12x^2 - 228x + 1480$ $r = 0,86; R^2 = 0,78$	$-x^2 + 8x + 49$ $r = 0,62; R^2 = 0,43$

komory dopalającej wpływa korzystnie na właściwości emisyjne kotła z punktu widzenia emitowanych cząstek stałych. Z przeprowadzonych badań wynika, że poziom zmniejszenia emisji pyłów i tlenków azotu jest zbliżony do poziomu osiąganego przy doprowadzeniu pary do komory spalania, jednak wzrost emisji tlenku węgla(II) jest znikomy. Podstawą zrealizowanych badań była chęć potwierdzenia wcześniej przeprowadzonych badań nad możliwością obniżania emisji substancji szkodliwych przy zastosowaniu pary wodnej w kotłach grzewczych na paliwa stałe. Podstawą teoretyczną zrealizowanych badań była reakcja chemiczna (1), której efektem jest utlenienie węgla pierwiastkowego wchodzącego w skład np. sadzy. Zawartość tlenku węgla(II) powstałego w tej reakcji była w stopniu nieznacznym zmniejszana w komorze dopalającej, przy znaczącym ograniczeniu zawartości emitowanych pyłów. Uzyskane podczas badań efekty zmiany chemizmu procesu spalania są zadowalające, co może skłaniać do rozpowszechnienia tej technologii wśród producentów kotłów grzewczych na paliwa stałe. Zastosowanie technologii doprowadzenia pary wodnej do komory dopalającej kotła grzewczego pozwala ograniczyć ilość emitowanych pyłów, co wpływa korzystnie na poprawę ekologicznych parametrów

kotła. Dostarczenie pary w obrębie komory spalania nieznacznie zmienia sprawność kotła, jednak w odniesieniu do całego układu kotła grzewczego z wytwornicą pary zaobserwować można pogorszenie efektów ekonomicznych i energetycznych, wynikających z dodatkowego wysoce energochłonnego urządzenia pracującego w układzie z kotłem. Dodatkowym utrudnieniem formalnym stosowania zespołu kotła zaopatrzonego w komorę dopalającą oraz układ wytwarzania pary są wymogi wynikające z ustawodawstwa i przepisów pozwalających wdrożyć do użytkowania urządzenie pod ciśnieniem (parownica). Obstrzeżenia zawarte w przepisach mogą zdyskwalifikować lub znacząco utrudnić użytkowanie takiego układu w warunkach domowych. Jedną z przesłanek do dalszych prac badawczych jest ocena możliwości wytwarzania i dozowania mgły wodnej wytwarzanej metodami ultradźwiękowymi, gdyż układy takie zużywają znacząco mniej energii elektrycznej na wytworzenie mgły wodnej oraz eliminują konieczność projektowania zbiornika ciśnieniowego. Rozpatrując zasadność modyfikacji kotłów niespełniających obecnych przepisów krajowych i unijnych dotyczących czystości spalin, uznano, że jedną z możliwości poprawy ich parametrów emisyjnych oraz możliwości spełnienia obowiązujących norm jest modyfikacja ich konstrukcji w celu zaopatrzenia w dodatkową komorę dopalającą. Utrudnienia związane z wprowadzeniem tych modyfikacji nie podnoszą znacząco kosztów wytwarzania i sprzedaży urządzeń pozaklasowych (zgodnie z normą<sup>15)</sup>), jednocześnie stawiając je jako alternatywne rozwiązanie dla użytkowników

chcących pozostać przy wytwarzaniu ciepła poprzez energetyczne wykorzystanie paliw węglowych. W sektorze kotłów grzewczych na paliwa stałe główną konkurencją dla kotłów pozaklasowych z dokonaną modyfikacją są kotły zasilane peletami drzewnymi. Charakteryzują się one nieznacznie lepszymi parametrami emisyjnymi oraz lepszą efektywnością energetyczną, jednak są zazwyczaj kilkakrotnie droższe niż kotły starego typu. Wprowadzenie różnorodnych rozwiązań poprawiających emisję substancji szkodliwych z urządzeń grzewczych małej mocy daje potencjalnemu użytkownikowi możliwość wyboru odpowiedniego do danej sytuacji rozwiązania, przy zachowaniu korzystnych parametrów emisyjnych.

Praca wykonana w ramach projektu naukowego nr POIR.04.01.04-00-0135/16 „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwo stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej”, finansowanego przez NCBR.

Otrzymano: 11-03-2020

### LITERATURA

- [1] B. Ciupek, E. Janeba-Bartoszewicz, R. Urbaniak, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 8, 1283.
- [2] B. Ciupek, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 11, 1768.
- [3] R. Ślęfarski, *Energies* 2019, **12**, nr 3, 348.
- [4] R. Ślęfarski, J. Jójka, P. Czyżewski, P. Grzymiślawski, *Fuel* 2018, **217**, 490.
- [5] B. Ciupek, W. Judt, R. Urbaniak, R. Kłosowiak, *J. Ecol. Eng.* 2019, **20**, nr 10, 34.
- [6] T. Chmielniak, J. Bigda, M. Ściażko L. Stępień, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 1, 138.
- [7] S. Li, Y. Ge, X. Wei, *Fuel* 2018, **224**, 235.
- [8] B. Sungur, B. Topaloglu, *Renew. Energy* 2019, **143**, 121.
- [9] H. Wang, Ch. Zhang, X. Liu, *Appl. Therm. Eng.* 2020, **166**, 114633.
- [10] M. Trojan, *Energy* 2019, **175**, 1194.
- [11] M. Szega, T. Czyż, *Energy* 2019, **178**, 134.
- [12] M. Joachimiak, D. Joachimiak, M. Ciałkowski, L. Małdziński, P. Okoniewicz, K. Ostrowska, *Int. J. Therm. Sci.* 2019, **145**, 105985.
- [13] D. Joachimiak, *J. Appl. Fluid Mech.* 2020, **13**, nr 3, 935.
- [14] P. Madejski, *Appl. Therm. Eng.* 2018, **145**, 352.
- [15] PN-EN 303-5:2012, *Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy do 500 kW.*



## ***Impact of replacement of solid fuel heating boilers on air quality in Poland in 2000–2020***

# **Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000–2020**

DOI: 10.15199/62.2021.5.9

*Data on the concns. of selected harmful substances in the air were taken from openly available data collected in a measurement database. The measurements provided 1-hour and daily values of concns. of selected toxic compds. in the air. The mean annual concns. of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM10 and PM2.5 were oscillated in the range of 25.2–45.4, 4.6–9.8, 300–700, 25,1–40,9 and 18.1–46.3 µg/m<sup>3</sup>, resp. The main source of air pollution in Poland was the individual heating sector based on improperly operated solid fuel heating boilers. The activities performed so far to improve air quality in Poland did not significantly improve it.*

Przeprowadzono analizę stężeń substancji szkodliwych w powietrzu, związaną z procesem zmian legislacyjnych i wymianą kotłów grzewczych na paliwa stałe w ciągu ostatnich 20 lat w Polsce. Głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza w Polsce jest sektor ogrzewnictwa indywidualnego oparty na nieprawidłowo eksploatowanych kotłach grzewczych na paliwa stałe. Z roku na rok sytuacja związana z jakością powietrza poprawia się, jednak poprawa ta nie jest spektakularna i trudno doszukać się w niej świadomego działania mającego na celu ograniczenie ilości emitowanych substancji szkodliwych. Powodów tego stanu upatrywać można w złych nawykach eksploatacyjnych użytkowników kotłów grzewczych, dalszym wykorzystywaniu węgla kamiennego w krajowym ogrzewnictwie indywidualnym oraz skupieniu się branży kotłarskiej na badaniach legalizacyjnych kotłów, bez wdrożenia nowoczesnych systemów regulacji i kontroli

ich pracy. Z przeprowadzonych badań wynika, że ze względu na zanieczyszczenie powietrza w Polsce można wyodrębnić dwa okresy, sezon grzewczy, w którym obserwuje się znaczącą ilość emitowanych substancji szkodliwych, i okres letni, w którym udział zanieczyszczeń maleje. Stwierdzono, że dotychczas prowadzone działania zmierzające do poprawy jakości powietrza w Polsce nie wpłynęły znacząco na jego poprawę, co powoduje konieczność dalszego działania w tym kierunku i wprowadzania nowszych technologii z zakresu eksploatacji kotłów grzewczych na paliwa stałe lub ekologicznych źródeł ciepła. Wskazano propozycje dalszych kierunków zmian oraz rozwiązań technicznych pozwalających w sposób znaczący poprawić jakość powietrza.

W ostatnich 20 latach obserwuje się w Polsce nieznaczną poprawę jakości powietrza, chociaż jego niska jakość jest tematem nadal poruszonym w dyskusji publicznej. Wpływ na obecną sytuację mają szeroko propagowane akcje edukacyjne oraz działania legislacyjne wraz z programami wymiany domowych urządzeń grzewczych na nowoczesne źródła ciepła, w tym nowoczesne kotły opalane paliwami stałymi, spełniające wymagania aktualnych norm i dyrektyw<sup>1,2</sup>). Niestety, nadal głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza w Polsce są nieprawidłowo eksploatowane źródła ciepła zasilane paliwami stałymi (kotły, piece, kuchenki), które generują tzw. niską emisję. Prognozowane zużycie węgla kamiennego w krajowym ogrzewnictwie indywidualnym w 2030 r. to ok. 3,8 mln t<sup>3</sup>). Dotychczas stosowanymi działaniami zmierzającymi do poprawy jakości powietrza było wprowadzenie systemów ewidencjonowania domowych źródeł ciepła<sup>4</sup>) oraz monitoro-

Inż. Karol GOŁOŚ – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr. 3/2021, str. 221.

\* Autor do korespondencji:

Instytut Energetyki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 665-2214, e-mail: karol.golos@student.put.poznan.pl

Mgr inż. Bartosz CIUPEK – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr. 3/2021, str. 221.

wanie jakości powietrza<sup>5,6</sup>) za pomocą czujników smogowych. Jednak działania te nie wpływają bezpośrednio na poprawę stanu powietrza, pełnią jedynie funkcję monitorująco-informacyjną. Potwierdzają to raporty o jakości powietrza w Polsce oraz duża liczba miast polskich znajdujących się w europejskich statystykach na czołowych miejscach o najgorszej jakości powietrza.

Jedną z propozycji czynnego oddziaływania na jakość spalania w kotłach są nowoczesne analizatory spalania, które nie tylko umożliwiają analizę samego procesu, ale również wpływają na modyfikację parametrów pracy algorytmu regulacji. Przykładem takiego rozwiązania jest analizator jakości procesu spalania Brager BCA-02<sup>5,6</sup> (rys. 1). Głównym zadaniem analizatorów jakości procesu spalania jest bezpośrednie i ciągłe monitorowanie podstawowych parametrów termodynamicznych odpowiedzialnych za jakość procesu spalania (zawartość tlenu, ditlenku węgla, temperatura spalin i ich zapylenie) oraz jednoczesne sterowanie procesem spalania tak, aby jego praca mieściła się w zakresie spalania stechiometrycznego. Analizator jakości procesów spalania Brager BCA-02 eco w połączeniu z systemami sterowania pracą kotłów, na podstawie informacji pomiarowych z czujników tak dostosowuje proces spalania, aby w zakresie zakładanych mocy prowadzić go w sposób ekologiczny i ekonomiczny<sup>6-9</sup>. Analizując dotychczas prowadzone badania naukowe<sup>8</sup>) oraz zmiany jakości powietrza w Polsce, dalszym kierunkiem działań zmierzającym do rzeczywistej poprawy jakości powietrza powinno być obligatoryjne wprowadzenie analizatorów procesu spalania w kotłach na paliwa stałe. Analogiczne postępowanie nastąpiło w sektorze motoryzacyjnym. Dopiero zastosowanie czujników tlenu w spalinach (sonda lambda) oraz prowadzenie regulacji pracy silnika spalinowego na podstawie współczynnika nadmiaru powietrza pozwoliły na zmniejszenie ilości emitowanych substancji szkodliwych oraz spełnienie rygorystycznych norm czystości spalin przez pojazdy drogowe.



Fig. 1. The combustion quality analyzer Brager BCA-02 eco

Rys. 1. Analizator jakości procesu spalania Brager BCA-02 eco

Celem przeprowadzonych badań była analiza jakości powietrza w ostatnich 20 latach w Polsce. Jako wyznacznik jakości powietrza przeanalizowano stężenia masowe najczęściej występujących w Polsce zanieczyszczeń powietrza. Do badań posłużyły ogólnodostępne pomiary prowadzone przez stacje badawcze zlokalizowane w całej Polsce oraz własne badania laboratoryjne kotłów grzewczych z wykorzystaniem analizatora jakości procesu spalania Brager BCA-02 eco.

Wyniki pomiarów służące analizie zebrano dzięki działalności Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ), utworzonego usta-

wą o Inspekcji Ochrony Środowiska<sup>10</sup>). Struktura PMŚ składa się z sieci stacji pomiarowych zlokalizowanych w obrębie całego kraju, z uwzględnieniem w szczególności miejsc związanych z dużą intensywnością emitowanych związków szkodliwych. Stacje rejestrują w trybie automatycznym oraz manualnym pomiary stężeń substancji szkodliwych, które są gromadzone i przetwarzane w krajowej bazie danych JPOAT2,0. Kryteria lokalizacji punktów pomiarowych zapewniających stabilny oraz dokładny wlot powietrza do czepni analizatorów zostały omówione zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu<sup>11</sup>). Wyniki pomiarów automatycznych są przesyłane i udostępniane bezpośrednio przez portal „Jakość powietrza w Polsce”. Wyniki pomiarów manualnych są przekazywane z odstępem czasowym 1–1,5 miesiąca od momentu pomiaru, co wynika ze specyfiki przebiegu pobierania próbek oraz ich badania. Obecna liczba stacji w Polsce, z których są rejestrowane pomiary wynosi ok. 190, jednakże z roku na rok liczba ta ulega zmianom związanym z kwestiami eksploatacyjnymi. Przykładowe stanowisko pomiaru pyłu zawieszonego zlokalizowane w Mosinie (woj. wielkopolskie) przedstawiono na rys. 2. Na stacji tej prowadzony jest automatyczny pomiar stężenia PM<sub>10</sub> w powietrzu za pomocą urządzenia ENVEA MP101M, z funkcją przesyłu danych w odstępach 1-godzinnych do elektronicznego systemu gromadzenia danych i zakresem pomiarowym 0–10 000 µg/m<sup>3</sup>.



Fig. 2. Example of the particulate matter measuring station

Rys. 2. Przykładowa stacja pomiaru pyłu zawieszonego



Mgr inż. Wojciech JUDETA w roku 2017 ukończył studia na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Jest asystentem w Instytucie Energetyki Ciepłej tej uczelni. Specjalność – modelowanie procesów cieplnych, wymiana ciepła.



Dr hab. inż. Rafał URBANIAK w roku 2018 uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn. Od 2014 r. pełni funkcję prezesa zarządu firmy BRAGER Sp. z o.o. Specjalność – procesy spalania.

## Część badawcza

### Dane pomiarowe

Do analizy danych o stężeniach wybranych substancji szkodliwych w powietrzu wykorzystano ogólnodostępne dane gromadzone w banku danych pomiarowych w ramach programu PMŚ. Zebrane pomiary informowały o 1-godzinnych oraz dobowych poziomach stężeń wybranych związków toksycznych w powietrzu w latach 2000–2020. Badanymi substancjami były tlenki azotu  $\text{NO}_x$ , ditlenek siarki  $\text{SO}_2$ , pył zawieszony  $\text{PM}_{10}$  oraz  $\text{PM}_{2.5}$ .

Pomiary stężeń analizowanych substancji szkodliwych w powietrzu były rejestrowane z pozycji punktów pomiarowych, w których stosowane są referencyjne metody badawcze zgodnie z zał. 7 rozporządzenia<sup>11)</sup>. W tabeli zestawiono metody pomiarowe wybranych substancji toksycznych.

Table. The summary of measurement methods for individual harmful substances

Tabela. Zestawienie metod pomiaru substancji szkodliwych

Substancja	Metodyka pomiarowa
Tlenki azotu, $\text{NO}_x$	chemiluminescencja <sup>12)</sup>
Ditlenek siarki, $\text{SO}_2$	fluorescencja w nadfiolecie <sup>13)</sup>
Pył zawieszony, $\text{PM}_{10}$	grawimetria (referencyjna) <sup>14)</sup>
Pył zawieszony, $\text{PM}_{2.5}$	
Tlenek węgla(II), CO	niedispersyjna spektroskopia w podczerwieni <sup>15)</sup>

### Metodyka badań

W celu uzyskania pełnej analizy przebiegu poziomów stężeń wybranych substancji szkodliwych w analizowanym okresie, wartości stężeń pobrane z bazy danych GIOŚ podzielono na dwie części, z których jedna dotyczyła stężeń rocznych, a druga obejmowała wartości średnich stężeń w okresach sezonu grzewczego w sektorze ogrzewnictwa oraz okresu poza sezonem grzewczym. Zgodnie z wytycznymi Inspektoratu Ochrony Środowiska za sezon grzewczy przyjęto okres od 1 października danego roku do 31 marca kolejnego roku kalendarzowego. Pozostały przedział czasowy zdefiniowano jako sezon niegrzewczy.

### Wyniki badań

Wyniki analizy odniesione do jakości powietrza przedstawiono na rys. 3 w postaci przebiegu średnich rocznych wartości w latach

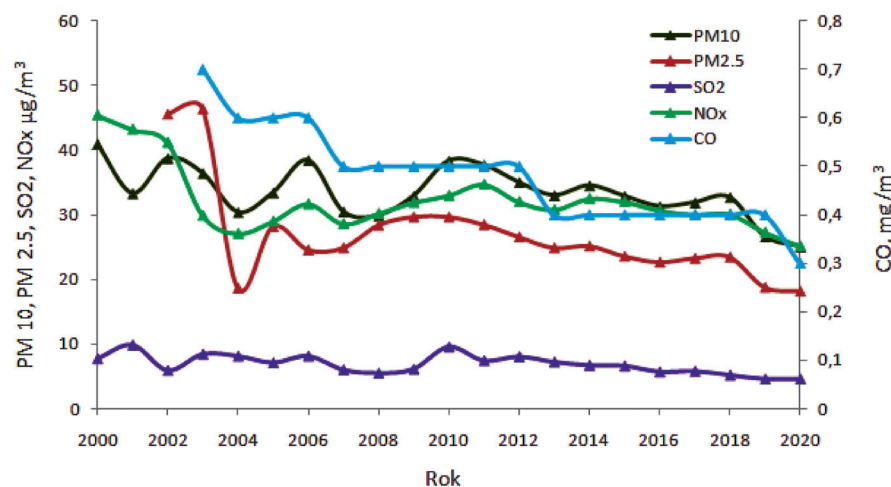


Fig. 3. Course of annual concentration levels of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  over the 2000–2020 years

Rys. 3. Przebieg rocznych poziomów stężeń  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  w latach 2000–2020

2000–2020. Stężenia tlenków azotu zmieniały się w przedziale 25,2–45,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ditlenku siarki w przedziale 4,6–9,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a tlenku węgla(II) w przedziale 0,3–0,7  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Wyniki stężeń rocznych  $\text{PM}_{10}$  mieściły się w zakresie 25,1–40,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a  $\text{PM}_{2.5}$  w zakresie 18,1–46,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Roczne emisje w latach 2000–2010 charakteryzowały się dużą i niestabilną zmiennością. Okres 2010–2012 można było uznać za okres stabilizacji, a wartości stężeń substancji szkodliwych w powietrzu wykazały niewielką tendencję spadkową, zauważalną dopiero w okresie 2012–2020, co było związane z wprowadzeniem zaostrożonych wymogów emisyjnych<sup>11)</sup> oraz wdrożeniem programu wymiany nieekologicznych kotłów grzewczych. Przebieg rocznych poziomów stężeń  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO oraz  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2.5}$  z uwzględnieniem sezonowości przedstawiono na rys. 4. Zestawienie przebiegów sezonowych emisji wykazało spadki stężeń badanych zanieczyszczeń w okresach niegrzewczych. Dla  $\text{NO}_x$  był to spadek o 33,2%, dla  $\text{SO}_2$  o 55,6%, dla CO o 40,7%, dla  $\text{PM}_{10}$  o 41,8% oraz dla  $\text{PM}_{2.5}$  spadek o 53,1%. Wyznaczone wartości dowodzą, że okres grzewczy był szczególnie obciążony wysokimi wartościami emisji z sektora ogrzewnictwa. W sezonie grzewczym 2020 r. zauważalna była dynamiczna zmiana wzrostowa emisji CO i  $\text{SO}_2$  oraz niewielki spadek  $\text{NO}_x$ . Wynikało to z reorganizacji trybu życia, wywołanej obostrzeniami związanymi z pandemią COVID-19. Większość tego czasu ludzie przebywali w domach, czego następstwem było intensywne użytkowanie kotłów domowych, a ich niewłaściwa eksploatacja wpływała na drastyczny wzrost emisji w wysokości 43,4% dla CO oraz 63,5% dla  $\text{SO}_2$  w odniesieniu do poprzedniego roku kalendarzowego. Skutkiem nieprawidłowości w użytkowaniu kotłów było pogorszenie jakości powietrza do poziomu, jaki był odnotowany przed wprowadzeniem programów naprawczych. Stwierdzono, że dalszy „twardy lockdown” może przyczynić się do pogłębienia złej jakości powietrza i trwałego odwrócenia tendencji spadkowej w ilości emitowanych substancji szkodliwych z ogrzewnictwa indywidualnego.

Na podstawie analizy wyników zaobserwowano coroczne spadki ilości emitowanych substancji szkodliwych względem początku badanego okresu. Ponadto zaobserwowano znaczące różnice w stężeniach emitowanych substancji szkodliwych, odnosząc sezon grzewczy do okresu bez nasilonego ogrzewania indywidualnego.

### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zrealizowanych prac badawczych zaobserwowano, że wpływ na jakość powietrza w Polsce ma w dużej mierze sektor ogrzewnictwa indywidualnego. Stwierdzono, że rzeczywista eksploatacja kotłów grzewczych małej mocy wpływa znacząco na jakość powietrza<sup>10, 11)</sup>. Związane jest to z emisją substancji

szkodliwych z procesów spalania paliw stałych. Przeprowadzone badania i późniejsza ich analiza jednoznacznie pokazały, że przyczyną tak wysokiego zanieczyszczenia środowiska naturalnego są nieprawidłowo eksploatowane kotły na paliwa stałe. Obserwowano wyraźną korelację poprawy jakości powietrza z procesem wprowadzania nowych norm emisyjnych i nasilonej wymiany kotłów w ostatnich latach. Niestety, Polska jak większość krajów europejskich nie jest w stanie całkowicie zrezygnować z zastosowania paliw stałych w energetyce.

Analizując eksploatację kotłów w warunkach rzeczywistych<sup>16)</sup> stwierdzono, że jednym z rozwiązań, które w perspektywie najbliższych lat może wpływać na dalszą poprawę powietrza, jest zmiana sposobu kontroli i sterowania pracą kotłów, poprzez zastosowanie nowoczesnych sterowników i analizatorów tlenu. Głównym wnioskiem płynącym z badań jest

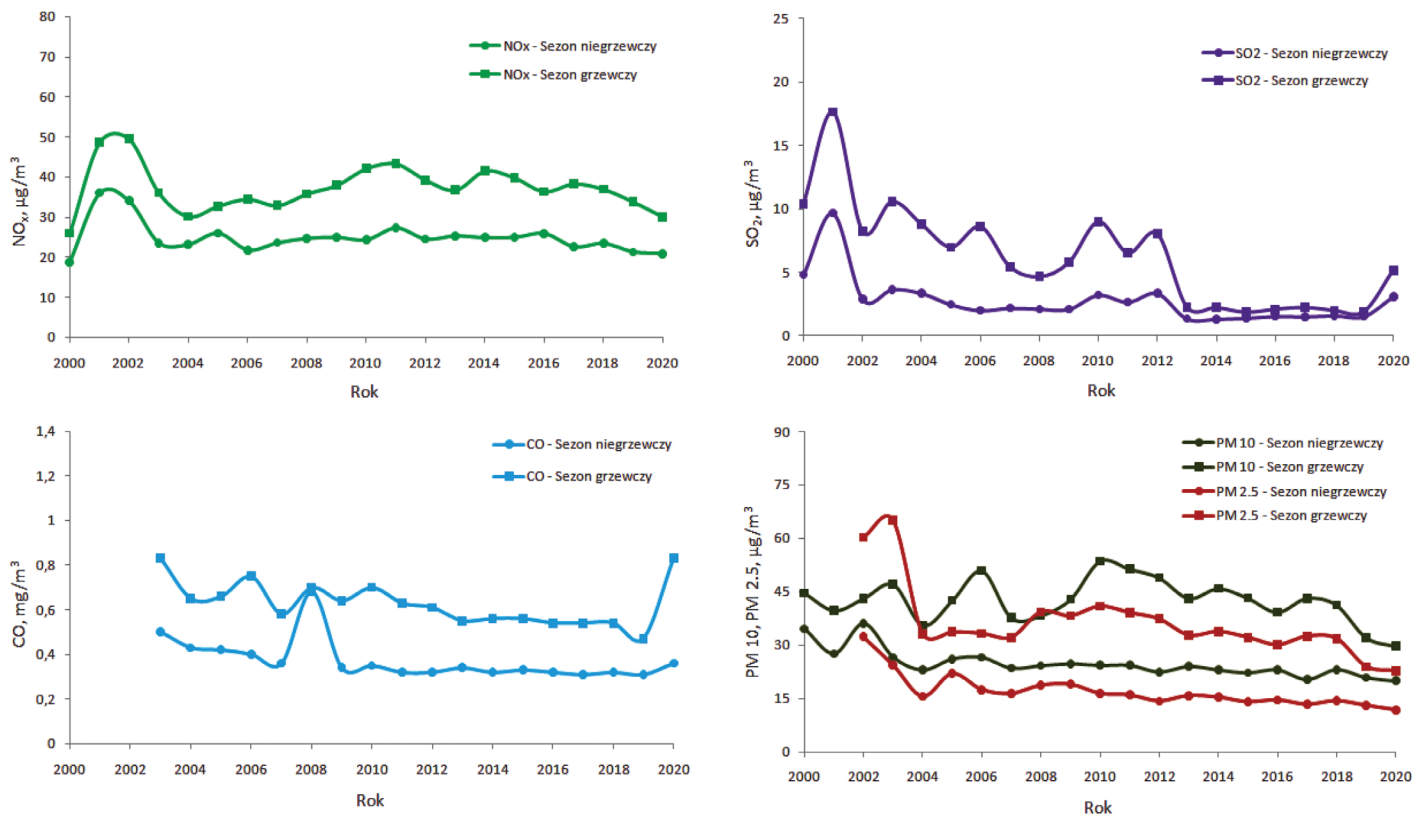


Fig. 4. Course of annual concentration levels of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> divided into heating seasons

Rys. 4. Przebieg rocznych poziomów stężeń NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> z podziałem na sezony grzewcze

to, że pomimo wdrożenia programów wymiany kotłów starego typu na nowoczesne w latach 2012–2020<sup>17, 18</sup>), nadal dość dużym problemem jest niska emisja w okresie grzewczym. Przyczyną tego stanu jest brak precyzji w regulacji pracy kotłów grzewczych, związany z wykorzystaniem jedynie informacji o pożądanej przez użytkownika mocy cieplnej lub temperaturze wody zasilającej układ grzewczy. Niewykorzystywanie informacji o jakości procesu spalania do regulacji pracy kotła wpływa na wysoki poziom emitowanych substancji szkodliwych i zawyżone zużycie paliwa. Sprzężenie zwrotne informacji o jakości procesu spalania pozwala w sposób zbliżony eksploatować kotły w zakresie emisji substancji szkodliwych osiągniętych w testach laboratoryjnych<sup>16–20</sup>). Jednym z elementów mogących czynnie poprawić jakość powietrza w Polsce są systemy automatycznej regulacji procesu spalania, wpływające na poprawę warunków pracy kotłów małej mocy w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Rozwiązania te do poprawnej i w pełni automatycznej pracy potrzebują sprzężenia zwrotnego w postaci informacji o aktualnym przebiegu procesu spalania.

Dalsze działania zmierzające do poprawy jakości powietrza w Polsce powinny zmierzać w kierunku obligatoryjnego stosowania w konstrukcjach kotłów analizatorów jakości spalania, obowiązkowej ewidencji indywidualnych źródeł ciepła, wzmocnienia infrastruktury monitoringu środowiskowego o kolejne stacje pomiarowe, zmian legislacyjnych i dostosowania norm dla badań urządzeń grzewczych w warunkach rzeczywistej eksploatacji, przyspieszenia wycofania paliw węglowych z użytku indywidualnego i wzmocnienia sektora paliw zdekarbonizowanych i odnawialnych<sup>21</sup>) oraz wzmocnienia udziału odnawialnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie indywidualnym.

Wielotorowe podejście do problemu jakości powietrza w Polsce i wprowadzenie powyższych propozycji powinno przyczynić się do poprawy jakości powietrza w Polsce na przestrzeni najbliższych, jak i przyszłych lat.

Otrzymano: 23-03-2021

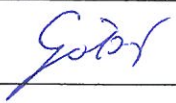


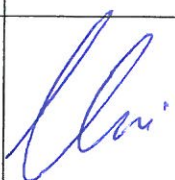
#### LITERATURA

- [1] PN-EN 303-5:2012, *Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy do 500 kW*.
- [2] Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189, w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/124/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe, *Dz. U. L 193 z 21.07.2015*.
- [3] J. Robak, K. Ignasiak, P. Fudata, I. Helt, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 3, 257.
- [4] *Pat. pol.* 416183 (2016).
- [5] *Zgł. pat. pol.* 434710 (2020).
- [6] *Pat. pol.* 126597 (2015).
- [7] R. Urbaniak, *Optymalizacja pracy automatycznych urządzeń grzewczych o małej mocy*, WPP, Poznań 2018.
- [8] B. Ciupek, E. Janeba-Bartoszewicz, R. Urbaniak, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 8, 1283.
- [9] B. Ciupek, *Przem. Chem.* 2020, **99**, nr 8, 1163.
- [10] Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska, *Dz. U.* 1991 nr 77 poz. 335.
- [11] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu, *Dz. U.* 2018 poz. 1119.
- [12] PN-EN 14211:2013-02, *Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku azotu i tlenku azotu za pomocą chemiluminescencji*.
- [13] PN-EN 14212:2013-02, *Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku siarki za pomocą fluorescencji w nadfiolecie*.
- [14] PN-EN 12341:2014-07, *Powietrze atmosferyczne. Standardowa gravimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM<sub>10</sub> lub PM<sub>2,5</sub> pyłu zawieszonego*.
- [15] PN-EN 14626:2013-02, *Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia tlenku węgla za pomocą niedyspersyjnej spektroskopii w podczerwieni*.
- [16] B. Ciupek, W. Judt, R. Urbaniak, R. Kłosowiak, *J. Eco. Eng.* 2019, **20**, nr 10, 34.
- [17] B. Ciupek, W. Judt, R. Urbaniak, *E3S Web Conf.* 2019, **128**, 01010.
- [18] B. Ciupek, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 11, 1768.
- [19] D. Joachimiak, *J. Appl. Fluid Mechanics* 2020, **13**, nr 3, 935.
- [20] D. Joachimiak, *Pol. Maritime Res.* 2017, **24**, 83.
- [21] Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r., *Dz. U.* 2021 poz. 264.

Poznań, 28.04.2021

### Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej

Karol Gołoś, **Bartosz Ciupek**, Wojciech Judt, Rafał Urbaniak, Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000–2020, Przemysł Chemiczny - 2021, Tom 100, nr 5, s. 486-489, DOI: 10.15199/62.2021.5.9

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	Karol Gołoś	Redakcja tekstu publikacji, opracowanie graficzne publikacji.	20%	
2.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Opracowanie koncepcji i metodyki realizacji badań. Zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie wniosków końcowych, wsparcie merytoryczne.	65%	
3.	Wojciech Judt	Wsparcie merytoryczne.	10%	
4.	Rafał Urbaniak	Opracowanie koncepcji pracy badawczej. wsparcie merytoryczne	5%	

## Article

# Analysis of Low-Power Boilers Work on Real Heat Loads: A Case of Poland

Bartosz Ciupek <sup>1</sup>, Wojciech Judt <sup>1,\*</sup>, Karol Gołoś <sup>1</sup> and Rafał Urbaniak <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Fuels and Renewable Energy, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Institute of Thermal Engineering, Poznan University of Technology, 60-965 Poznan, Poland; bartosz.ciupek@put.poznan.pl (B.C.); karol.golos@student.put.poznan.pl (K.G.)

<sup>2</sup> BRAGER Ltd., 63-300 Pleszew, Poland; r.urbaniak@brager.com.pl

\* Correspondence: wojciech.judt@put.poznan.pl; Tel.: +48-61-665-23-31

**Abstract:** The paper presents the methods of determination of the actual operation of solid fuel heating boilers in Poland. The analysis was based on an average annual distribution of the actual power outputs of the solid fuel heating boilers operated in four selected locations in Poland. Based on said data, three characteristic percent shares have been estimated of the nominal power outputs, at which the heating boilers in Poland operate throughout the year (divided into four characteristic portions—the seasons of the year). Additionally, for the analysis, the authors took into account the average annual temperature amplitude and the annual air quality information for the discussed locations and analyzed 30 solid fuel heating boilers in terms of their performance in the laboratory certification tests. In the final stage of the investigations, the authors initiated laboratory tests on the application of the combustion quality analyzers and their potential benefits.

**Keywords:** low-power boiler; solid fuel; real heat load; harmful substances; emission



**Citation:** Ciupek, B.; Judt, W.; Gołoś, K.; Urbaniak, R. Analysis of Low-Power Boilers Work on Real Heat Loads: A Case of Poland. *Energies* **2021**, *14*, 3101. <https://doi.org/10.3390/en14113101>

Academic Editors: Paweł Ocioń and Piotr Cisek

Received: 23 April 2021  
Accepted: 23 May 2021  
Published: 26 May 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Recently, in Poland, one may have observed a slight improvement in the air quality. This is influenced by the widely propagated education programs and domestic heating upgrade schemes such as the introduction of modern heating boilers including solid fuel heating boilers compliant with the Ecodesign Directive [1]. Unfortunately, domestic heating, due to the inappropriate combustion of solid fuels, still remains the main source of air pollution in Poland. One of the methods of reducing smog is the introduction of a database of domestic heating boilers and increasingly frequent monitoring of the air quality based on sensing of the concentration of particles in the air. These actions do not directly impact the air quality improvement. They are used strictly for monitoring and information purposes. This can be confirmed by four reports on the air quality in Poland as well as the high number of Polish cities in the European statistics having the worst air quality [2]. According to the work of [3], about of 90% of the total emission of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> comes from individual heating sector. Particulate matter emission has a big impact for respiratory and cardiovascular morbidity [4]. The problem of air pollution is also observed in China, where the amount of solid fuels used for heating purposes is very high. In China, approx. 67% of the households are heated with low quality coal [5]. It is estimated that the low air quality in China is responsible for approx. 400,000 fatalities per annum [6]. Researchers also focus on the reduction of energy consumption used for the heating of buildings.

For many years, the authors of this paper have been researching the improvement of the emission and energy-related parameters in modern solid fuel heating boilers [7–11]. Unfortunately, the recently changing requirements as to the parameters of newly designed equipment do not result in a significant improvement of the air quality. In 2018, according to Polish Office of Statistics (GUS), almost 36% of Polish households were heated with solid fuel heating boilers [12]. In China, when analyzing the effectiveness of different

modernization schemes, no significant improvement of the air quality was observed when substituting low quality fossil fuels with high-energy coal [13]. In Lithuania, this problem was solved when a successful transformation was implemented based on substituting fossil fuels with renewable energy sources. In the 1990s, in Lithuania, approx. 25% of the households were still using coal as their main fuel [14]. In 2012, the use of coal in Lithuania was approx. 4% of the total used energy and the dominating heating method was solid biofuels, with a share of approx. 35% [15].

The analysis of the heating boiler actual operation in Poland is based on the analysis of the power output, at which these appliances operate throughout the year and on the pollutant emissions to the environment during their operation. An optimum situation would be if all heating boilers operating in Poland worked at their nominal power, i.e., the maximum for a given appliance. As has been widely analyzed by Barma [16], the operation of a heating boiler at its nominal power ensures its highest efficiency and lowest unit emission of pollutants. The actual conditions, under which the heating boilers are operated, are far from those assumed for the nominal power outputs of a given appliance. These deviations are influenced by the weather conditions, the fuel quality, the adjustment of the combustion setting and its precision, as well as the technical and operational parameters of the heating boilers. In reality, a variety of different parameters jointly influencing the heating boiler operation cause majority of the heating devices to operate on a sub-optimum level. This translates into low operating parameters of the heating boilers, such as high emission of pollutants and increased consumption of fuel. The currently known methods of reduction of particle emissions from the combustion of solid fuels in heating in the form of particle filters [17] allow a reduction of the emissions to the admissible level, but they do not act on the cause of the emission lying in the combustion process under actual conditions of operation.

One of the elements that could actively improve the air quality in Poland, influencing the actual operating conditions of low power heating boilers are automatic combustion adjustment systems. These systems are based on self-learning artificial neural networks governing the operation of an appliance based on the data collected in real time [18,19]. Some of the system components are state-of-the-art combustion quality analyzers. The main idea behind these analyzers is direct and continuous monitoring of the basic thermodynamic parameters responsible for the combustion process (the content of oxygen and carbon dioxide, the temperature of the flue gas and the content of particles in the flue gas, etc.) and a simultaneous control of the heating boiler with a view to making its work fall in the stoichiometric range (full and complete combustion). Combustion quality analyzers, in combination with the heating boiler control systems, adapt the combustion process to make it environment friendly and economical within the assumed range of power outputs and temperatures of the heating water. One of the methods of improvement in the air quality in Poland related to the optimization of the actual heating boiler operation is the enforcement of additional monitoring-optimization systems such as combustion quality analyzers.

## 2. Materials and Methods

The first stage of the research works was the estimation of the pollutant emissions during the laboratory investigations for 15 heating boilers fueled with wood pellet and 15 heating boilers fueled with hard coal. For this purpose, the authors used data from the certification sheet of the selected appliances obtained during operation at a minimum power of 30% of the nominal power output and at the nominal power output. The aim of the analysis was to estimate the average emission related parameters of the heating boilers during their certification. The next step consisted in distinguishing four Polish towns located at a significant distance from one another in order to analyze the average annual amplitude of temperatures in the years 2018 and 2019 and analyze the air quality in this period. The analysis of the air quality was carried out based on generally available historic data from Chief Inspectorate of Environmental Protection (GIOŚ) [20]. Based on the measurements of the average annual temperature, these were calculated for each

month of the year, as well as the average annual emission of pollutants in the analyzed period. Within the analysis of the pollutant emissions, average emissions of CO, NO<sub>x</sub>, PM and SO<sub>2</sub> were obtained. Within the four selected locations, a solid fuel heating boiler for a single household was selected for the investigations and its actual thermal load was analyzed for the period under investigation. The performance of the analysis enabled a determination of the relations between the actual operation of the heating boilers for different locations in Poland and their influence on the air quality in the said locations. Within the scope of the research, the authors carried out investigations of the pollutant emissions for three solid fuel heating boilers fueled with hard coal and wood pellet. For the investigations, the authors selected appliances that complied with the applicable standards and directives as well as the out-of-class ones. During the investigations, the authors measured the emission of pollutants (CO, NO<sub>x</sub> and PM) for appliances operating at actual thermal loads determined during earlier stages of the research. The additionally obtained pollutant emissions were compared with the results obtained under laboratory conditions.

### 2.1. Heat and Associated Devices

The investigations were carried out on three low power heating boilers fueled with the most frequently used fuels in Poland: hard coal and wood pellet. The pellet-fueled heating boiler (Q Pellet GL 25 by Heiztechnik, Skarszewy, Poland) is a low-temperature heating boiler of the nominal power output of 25 kW compliant with class 5 (highest) of the environment protection requirements as per the PN-EN 303-5:2012 standard. Its design is based on a smoke tube heat exchanger and the range of obtainable thermal power is 8–25 kW. The heating boiler was fueled with wood pellet. The pellet supply was automatic and its combustion was realized using a chute burner (PellHard PLUS by Heiztechnik, Skarszewy, Poland) fitted in the front part of the heater. The heating boiler was controlled by HT-tronic 900 by Brager, Pleszew, Poland, allowing modulating the power output by selecting appropriate doses of fuel and the amount of air fed during the process of combustion.

The other two investigated heating boilers were Q EKO 20 by Heiztechnik, Skarszewy, Poland (automatic fuel supply) of the nominal power output of 20 kW. The heating boilers were fueled with hard coal of the grain size from 5 to 25 mm operating in the range of 6–20 kW. The fundamental difference in both heating boilers is the fact that one of them meets the class 5, PN-EN 303-5:2012 requirement [21] and the other one is an out-of-class appliance. Both heating boilers differ in the design of their combustion chambers. A microchip controller governs the operation of both heating boilers.

The class 5 Q EKO 20 heating boiler was equipped with a cast iron rotary burner (DUO by PANCERPOL, Dąbrowa Górnicza, Poland) fitted in the combustion chamber. The heater had a weather compensator (HT Tronic 700 Sensor by Brager, Pleszew, Poland) allowing the adjustment of the thermal power by precise air and fuel dosage to the combustion chamber. Figure 1 presents the pellet-fueled heater (left) and the hard coal fueled heater (right).



**Figure 1.** Heating devices used in tests. In left side: Q Pellet GL 25; in right side: Q EKO 20.



## 2.2. Chemical Parameters of Fuel

In the investigations, the authors used hard coal (eco-pea coal) and wood pellet. Both fuels were applied in the as-received condition and, for more accurate determination of their parameters, a prior technical analysis was performed as per the [22] standard. The obtained results have been presented in Table 1.

**Table 1.** Ultimate analysis of hard coal and biomass used during the research.

Type of Measurement	Hard Coal	Hard Coal Limits [21]	Biomass (Wood Pellet)	Biomass (Wood Pellet) Limits [21]
Free moisture %	6.84	-	5.85	-
Air-dry fuel moisture %	2.92	-	2.16	-
Total moisture %	9.56	≤11	8.01	≤12
Ash content %	5.97	2 to 7	0.21	≤0.5
High calorific value MJ/kg	29.86	-	18.26	-
Low calorific value MJ/kg	28.71	>28	17.22	>17

## 2.3. Heat Load Measurement

In order to ascertain the power, at which the heaters were operated under their actual operating conditions, the authors used data pulled from a heater control and monitoring system by eCoal [23]. Upon consent, each user having the eCoal module installed in his/her heater can make the heater parameter data available directly on a server. The server allows each external user checking the parameters of a given heater in an analyzed time frame. Four heaters located in four towns in Poland (Bydgoszcz, Lublin, Zielona Góra and Warsaw, Poland) were selected. For the analysis, the authors used data related to the operating power on a given day. This information allowed us to obtain the average thermal powers of the heaters as divided into seasons of the year as well as their averaging on the annual scale.

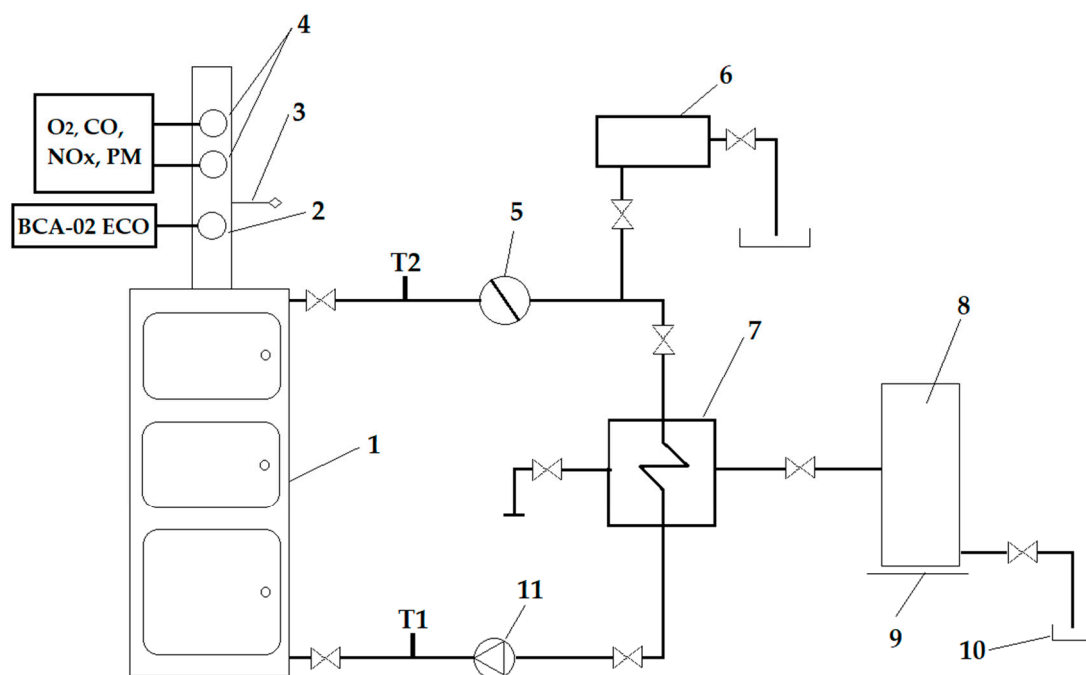
According to the PN-EN 303-5:2012 standard, the thermal power is determined via a direct method, consisting in measurements of the thermal power in a water circulation system of the heating boiler or via an indirect method based on measurements of the thermal power in the water heat exchanger. According to the direct method, the usable thermal power on the side of the heating water is determined via the measurement (in the boiler circulation system) of the mass flow of cold water supplied to the heater circulation and the water temperature increment compared to the temperature at the outlet or via the measurement of the mass flow of water circulating in the heater system and its temperature increment. When investigating the heating boiler of the nominal power output, the average temperature value of water at the outlet should fall in the range from 70 °C to 90 °C and the average temperature difference between the outlet and return water should fall in the range from 10 K to 25 K. Figure 2 presents the diagram of the test stand.

## 2.4. Harmful Substances Emission Measurement

Within the realized research works, one measurement station for each town was selected. The location and type of stations have been presented in Table 2.

**Table 2.** The location and type of measurement stations.

Locations	Measuring Station Code	Station Address
Bydgoszcz	PL0252A	ul. Pl. Poznański
Lublin	PL0507A	ul. Obywatelska
Zielona Góra	PL0213A	ul. Krótka
Warszawa	PL0140A	al. Niepodległości



**Figure 2.** Scheme of test stand: 1—solid fuel heating boiler, 2—chimney, 3—measurement temperature, 4—measurement points of pollutants, 5—water flow meter, 6—expansion tank, 7—heat exchanger, 8—water tank, 9—weight scale, 10—outflow, 11—water pump.

All the above stations were stations that allow an automatic measurement and recording of the level of pollutants: CO, NO<sub>x</sub>, OGC and PM with a time step of one hour. In order to determine the emission of pollutants in the analyzed town, the results of the measurements of the emission of individual pollutants were averaged monthly and attributed to the heating seasons (seasons of the year).

For the performance of the measurements in the laboratory investigations of the actual operation of heating boilers, the authors used three types of measurement devices. Each device was responsible for the measurements of different thermodynamic and emission related parameters.

The first device was Testo 350-S (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) in a two-component configuration—a controller and an analyzer. The analyzer was fitted with an O<sub>2</sub> cell with a measurement range 0–25% vol. and error  $\pm 0.8\%$ , which allowed recording the level of oxygen in the flue gas. Additionally, the temperature of the flue gas was measured with the accuracy of  $\pm 1$  °C.

Another device was a Testo 380 particle analyzer (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) together with a Testo 330-2 LL flue gas analyzer (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) that served the purpose of controllers fitted with a display. Testo 380 served to measure the particulate matter within the range 0–300 mg/m<sup>3</sup> and the measurement error of  $\pm 5$  mg/m<sup>3</sup>. Thanks to the application of both devices at the same time as a joint unit, the authors could measure the concentration of carbon monoxide CO (0–8000 ppm) and nitrogen monoxide NO (0–3000 ppm) calculated to nitrogen oxides NO<sub>x</sub>. The images of the measurement devices have been shown in Figure 3.



**Figure 3.** Exhaust gas analyzers used in tests. in left side: Testo 350s; in right side: Testo 380 and Testo 330-2 LL.

### 2.5. Combustion Process Quality Analyzer

For the research part, the authors used a combustion quality analyzer (BCA-02 ECO) for the determination of the emission of pollutants when the analyzer was used and when it was not used.

The BCA-02 ECO combustion quality analyzer is an electronic device that allows a continuous measurement of the thermodynamic parameters that determine the combustion process. It can automatically select the heater operating parameters to optimize the combustion. The BCA-02 ECO analyzer is a compact device for the analysis of the parameters of combustion of solid fuels. The basic parameters measured by the device are the oxygen level % and the temperature °C of the flue gas. The device is compatible with all types of heating boilers and is fitted in the exhaust pipe immediately downstream of the flue. The BCA-02 ECO analyzer measures and calculates the concentration of oxygen % and carbon dioxide (calculated) %, the excess air coefficient  $\lambda$  (calculated), the flue gas temperature °C, the ambient temperature °C and the heat loss to the environment (calculated) %. The combustion quality analyzer is additionally equipped with an intelligent eco-indicator that sums up all the recorded parameters and continuously informs about the quality of the combustion process. The obtained parameters provide a feedback to the control system that allows the optimization of the combustion and increasing the heater energy efficiency. The operation of the device also leads to a reduction of the consumption of fuel as it optimizes the combustion process, which has impact on the rational use of fuel for the heating purposes and minimizes the workload of the user-operator. The image of the combustion quality analyzer has been shown in Figure 4.



**Figure 4.** A combustion process quality analyzer BCA-02 ECO (Brager, Pleszew, Poland).

### 3. Results and Discussion

At the first stage, the authors performed an analysis of the pollutant emissions from 15 heating boilers fueled with wood pellet and 15 heating boilers fueled with hard coal. The analysis was based on the results of the official certification tests. The investigations were conducted according to the PN-EN 303-5:2012 standard [21]. From the performed investigations, the authors obtained the emission parameters for 30% and 100% nominal power of the heating boiler. These values were collected and arithmetic averages were calculated. The obtained results have been shown in Tables 3 and 4. For further laboratory tests, three boilers were selected from the analyzed boilers: an out-of-class boiler (fuelled by coal) and two boilers meeting the 5th class in accordance with the standard [21] (fuelled by wood pellets and coal). The studies were carried out to compare emissions of harmful substances from boilers operated in domestic conditions with emissions of harmful substances obtained from these boilers in certification laboratory tests. Additionally, the selected boilers were used for research on the validity of using combustion process quality analyzers to reduce the amount of harmful substances emitted.

**Table 3.** Emission parameters from analyzed pellet boilers for 30% and 100% of nominal power.

Type of Measurement	30% of Nominal Power	100% of Nominal Power	Emission Limits [24]
CO mg/m <sup>3</sup>	239.84	127.73	<500.00
NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>	166.48	181.74	<350.00
OGC mg/m <sup>3</sup>	6.21	2.88	<20.00
Dust mg/m <sup>3</sup>	22.91	21.27	<40.00

**Table 4.** Emission parameters from analyzed hard coal boilers for 30% and 100% of nominal power.

Type of Measurement	30% of Nominal Power	100% of Nominal Power	Emission Limits [24]
CO mg/m <sup>3</sup>	341.76	128.55	<500.00
NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>	298.87	326.06	<200.00
OGC mg/m <sup>3</sup>	7.77	5.62	<20.00
Dust mg/m <sup>3</sup>	20.41	26.38	<40.00

Figure 5 presents the distribution of average annual temperatures for the four discussed locations. For the analyses, the authors used the data from national meteorological stations [25]. All selected locations, despite significant distance from one another, remain in the same climate zone.

Figure 6 presents averaged emissions of pollutants from the four discussed locations divided into seasons of the year.

The analyzed results were composed into average annual emissions of individual emission components for the years 2018 and 2019 in the discussed locations. The obtained results have been presented in Table 5.

**Table 5.** Average of the emission measurement for analysis localization.

Type of Measurement	Result
CO mg/m <sup>3</sup>	445.85
NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>	61.02
Dust mg/m <sup>3</sup>	33.50
SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	4.48

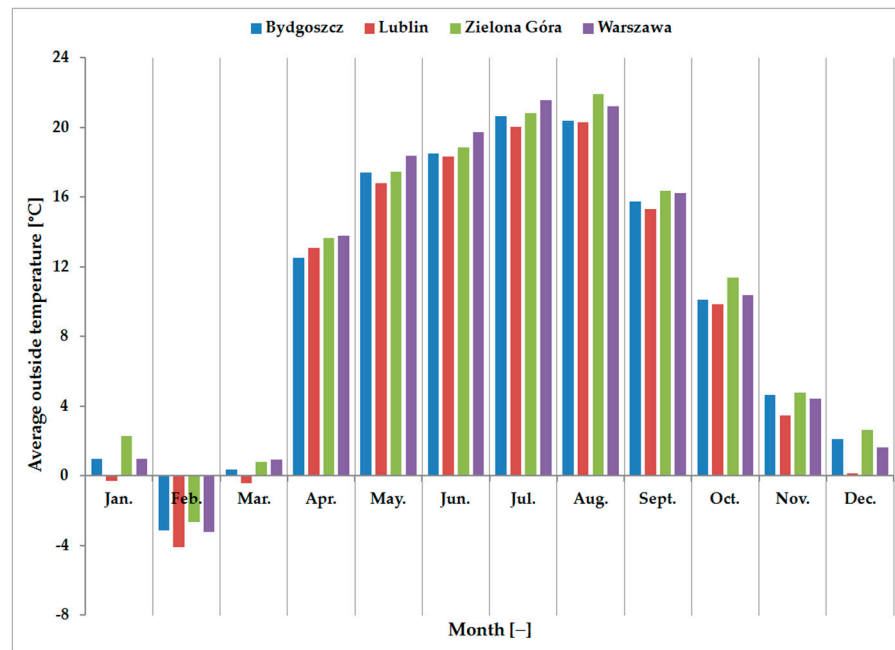


Figure 5. Distribution of average annual temperatures for the four discussed locations.

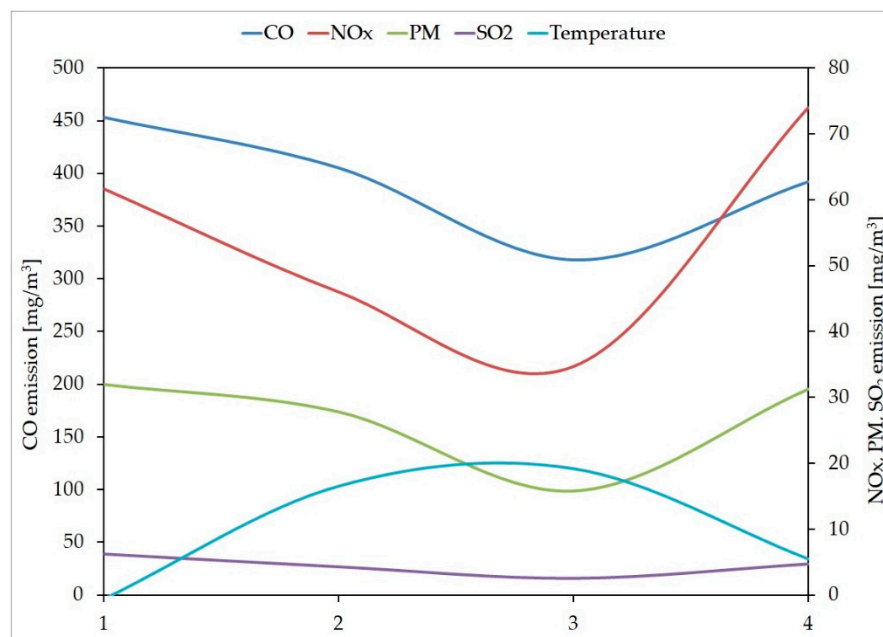


Figure 6. Averaged emissions of pollutants from the four discussed locations divided into seasons of the year, 1—autumn, 2—spring, 3—summer, 4—winter.

From the performed analyses, the results show that the main share in the emissions had CO and particulate matter. The values obtained for these two components, at a relatively low content of NO<sub>x</sub> in the flue gas, confirm that the main impact on the air pollution in the analyzed regions had the heating boilers that burned fuel on a sub-optimum level. The low content of nitrogen oxides at a significantly higher emission of CO and particulate matter confirm that the combustion process was characterized by oxygen starvation, which resulted in a non-full and incomplete combustion. In the conducted analysis, attention was paid to substance important from the point of view of air protection-sulfur dioxide SO<sub>2</sub>. According to the data developed by Statistics Poland [26] above 500,000 tons of this substance are emitted annually as a result of burning fossil fuels. In the case of

insufficient air supplied to the combustion process ( $\lambda < 1$ ), additional amounts of sulfur-related substances are formed: CS<sub>2</sub>—carbon disulphide and COS—carbon oxysulphide. The problem is particularly noticeable in the heating season in Poland [27], because this period of time achieves emission approximately twice as high as in the summer period, when the boilers are operated at several times lower power.

When analyzing the results of the smog analyzers and certified heating boilers, one can observe that the actual pollutant emissions from the heating boilers in typical operation are several times higher and for the low-emission heaters, are far from the original assumptions of their designers and manufacturers of the boilers.

When analyzing the measurement data, the authors observed that the highest power outputs were obtained by the heating boilers in the winter period and their thermal power fell in the range from approx. 26% to approx. 56% of the nominal power output. Another part of the year under analysis was fall and here the thermal power of this season fell in the range from approx. 14% to approx. 34% of the heater nominal power output. In spring, the thermal power of the heaters fell in the range from approx. 12% to approx. 30% of the nominal power output. The data confirm similar heating trends in the fall and spring periods. This is also supported by the analysis of the amplitude of temperatures for these seasons of the year. The average temperatures in these periods are similar, which forces the users-operators to perform similar operation related routines. The lowest share of thermal power was observed for the summer and, in this time of year, the percent share of the thermal power against the nominal power output was approx. 4% to 12%. The power calculation divided into seasons of the year has been presented in Table 6.

**Table 6.** Power calculation divided into seasons of the year for analysis localization.

Localization	Nominal Boiler Power	Real Heat Load			
		Winter	Spring	Summer	Autumn
Bydgoszcz	15 kW	26.20%	11.73%	5.33%	14.81%
Lublin	18 kW	37.03%	20.80%	11.56%	28.79%
Zielona Góra	12 kW	56.16%	31.74%	6.22%	33.74%
Warszawa	16 kW	29.22%	13.39%	4.17%	13.93%
	average	37.15%	19.42%	6.82%	22.82%

Based on the analyses of the thermal power, previously performed for the four heaters in different regions of Poland, the authors carried out the analyses of the actual operation of low power solid fuel heaters. Based on the analysis of the thermal power of the heaters in individual seasons, the following relations were observed:

- in the winter, the season of the lowest temperatures, the heaters were adjusted in such a way that their thermal power was the highest compared to other seasons of the year, but they did not reach the power greater than approx. 50% (approx. 40% on average) of the nominal power output, which confirms an incorrect matching of the appliance to the thermal expectations of the users (an overrated heater),
- the periods of fall and spring were characterized by coherent and similar thermal powers of the heaters and their power outputs did not exceed approx. 30% (approx. 20% on average) of the nominal power output. Additionally, when analyzing the curves of the thermal power in these periods, the authors observed that when temperatures lower than approx. 15 °C occurred, steplike, short lasting power peaks appeared, which may confirm the start of the house reheating process and the occurrence of the phenomenon referred to as overheating, which had impact on the periodic surge of the smog effect in these regions (September–October and April–May),
- the summer was a period of the lowest thermal power of the heaters. Often, the heaters did not operate and their power was 0%, yet, the average power fell in the range of approx. 10% of the nominal power output.

When analyzing the actual operation of the solid fuel heaters for several locations, the authors attempted to develop an equation to calculate the season-related emissions [1] that could be adapted in order to accurately and properly calculate the emissions from low-power solid fuel heaters (throughout the year).

The developed Equation (1) was based on analytical investigations of the thermal power outputs in the calendar year (actual operation) as well as on the smog effect analysis in the same period.

$$E_{ave} = 0.40 \cdot E_{40\%} + 0.50 \cdot E_{20\%} + 0.10 \cdot E_{10\%} \quad (1)$$

The efficiency of the reproduction of the emissions calculated based on the above equation was obtained following the iterative calculations and a reproduction of approx. 90% was obtained in the investigations of the pollutant emissions (CO, NO<sub>x</sub> i PM) for all the analyzed cases (certification tests and actual operation). The currently applicable equation for the calculation of the emissions of individual pollutants [24] assumes that the heaters operate at 30% of their power output for 85% of the year and at their nominal power output for 15% of the year. From on the performed investigations, it results that the heaters never reach their nominal power throughout the year and their operation at 30% of their power output occurs for approx. 50% of the year at the most. A certain generalization and lack of precision of the equation indexes in the applicable directive renders the average annual emission of pollutants from heaters inaccurate; hence, some corrections in the EU legislation are recommended.

Based on the obtained results from the combustion quality analyzer, the authors distinguished particle reduction indexes. For the particle reduction indexes, the average results from individual stages of the investigations were obtained in Table 7. The reduction was referred to the heaters that were not fitted with the analyzer:

**Table 7.** Reduction of dust emissions for a particular boiler and power load using the BCA-02 combustion process quality analyzer.

Season of Year	Unclassified Boiler for Hard Coal	Classified Boiler for Hard Coal	Classified Boiler for Wood Pellet
10% of Nominal Power	−15.00%	−37.00%	−14.00%
20% of Nominal Power	−31.00%	−48.00%	−39.00%
40% of Nominal Power	−25.00%	−25.00%	−31.00%

The effect of the performed analyses was the obtainment of an average reduction of the particle emission for the out-of-class heating boiler compliant with the applicable standards and directives and fitted with the BCA-02 combustion quality analyzer. Identical analyses were carried out in order to reduce the emission of CO<sub>2</sub> (results obtained based on the oxygen level in the flue gas). A change in the settings of the blower fan was observed, which influenced the amount of air fed to the combustion chamber so as to ensure stoichiometric combustion. The continuation of the stoichiometric combustion process resulted in a stable combustion in the entire volume of the fuel and a lack of visible loss of the unburned fuel. The obtained CO<sub>2</sub> reduction results (BCA-02 analyzer fitted) have been presented in Table 8.

**Table 8.** Reduction of CO<sub>2</sub> emissions for any types of analyzed boilers using the BCA-02 combustion process quality analyzer.

Reduction Substance	Unclassified Boiler	Classified Boiler
CO <sub>2</sub>	−5.64%	−6.87%

Another stage of the performed investigations was a validation of the improvement of the combustion following the installation of the combustion quality analyzer (whether it improves the heater emission level and the consumption of fuel). Tests were carried

out to ascertain whether there would be a change on the side of the consumed fuel and whether the application of the analyzer would impact the consumption of fuel. At first, the authors determined the amount of consumed fuel by the heater in its actual operation (for the previously obtained power outputs) without the combustion quality analyzer and then an analogical trial was performed after fitting the combustion-optimizing device. The determination of the amount of consumed fuel was performed according to generally applied standards: a volumetric and mass measurement of the residual fuel in the container. The obtained differences among individual trials allowed calculating the residual fuel in the container and based on this information, estimating the reduction of the consumption of fuel with the installed analyzer. The obtained results have been presented in Table 9.

**Table 9.** Reduction of fuel consumption for any types of analyzed boilers using the BCA-02 combustion quality analyzer.

Fuel Reduction Level	Unclassified Boiler	Classified Boiler
	−22.00%	−25.00%

#### 4. Conclusions

Based on the performed research works, one may observe that the air quality in Poland is heavily influenced by the domestic heating sector. We may risk a statement that actual operation of a low power heating boiler significantly influences the air quality. This is related to the emission of pollutants from the combustion of solid fuels. From the performed analyses of the relation between the emissions of pollutants during certification and the quality of air, we may observe a lack of coherence, which confirms that the operation of heating boilers under actual conditions is different from their operation under laboratory conditions. The differences are observed through varied levels of emissions, which deteriorates the quality of air in Poland. The situation indicates that the government upgrade schemes of the heating infrastructure do not materially impact the quality of air in Poland, which forces the need to further improve advanced optimization technologies for the heating boilers and implement them in their daily operation. The main conclusion from the analysis of the pollutant emissions, as regards combustion quality analyzers, is that despite the technological upgrades of the heating boilers, the process of their operation is still far from that characteristic of the certification procedures, which has a clear impact on the continuous emissions suspended 40 m above the ground level (low level emissions) in the heating season in Poland.

Supported with the performed investigations, the authors proposed a new equation for the calculation of the average annual emissions from solid fuel heating boilers. The individual members of the equations are based on the percent share of the averaged thermal power for a given season of the year. The enforcement of the analysis of the emission of pollutants from heating boilers for the calculated thermal power outputs and the determination of the average annual emissions based on the equation will allow validating the emissions generated by the heaters in the laboratory conditions as compared to those obtained under actual thermal loads. The further trends in research and legislation converging the emissions obtained under laboratory conditions with those obtained under actual operation will hopefully reduce the significant differences that are currently the case given the unreal laboratory results.

Based on the performed investigations on the pollutant emissions from heating boilers operated under laboratory and actual conditions, the authors observed that the adjustment of the combustion process is influenced by a variety of technological aspects, which has impact on its precision. The lack of precision in the adjustment of the combustion process is connected to the fact that the only information used in the adjusting process is the thermal power requested by the user or the temperature of water in the heating systems. Failing to use the information on the quality of the combustion process in the adjustment procedure results in a high level of pollutant emissions and increased consumption of



fuel. The feedback regarding the required thermal power of the heater and information on the quality of the combustion process allows reaching the emission parameters of the heaters similar to those obtained under laboratory conditions, which, in the case of actual heater operation, may result in their significant improvement. From the analysis of the obtained results of investigations on the rationality of application of combustion quality analyzers, one may observe a promising reduction of the emission of particulate matter, carbon dioxide and the consumption of fuel. All the effects were achieved maintaining the same thermal power of the heating boilers, which confirms that the analyzer does optimize the combustion and improves the consumption of fuel. The conclusion of the realized research work is the necessity of an obligatory introduction of combustion quality analyzers in low power heating boilers with a view to improving the air quality.

**Author Contributions:** Conceptualization, B.C. and R.U.; methodology, B.C. and R.U.; software, B.C.; validation, B.C., W.J. and K.G.; formal analysis, B.C., W.J. and K.G.; investigation, B.C., W.J. and R.U.; resources, B.C., W.J. and K.G.; data curation, B.C., W.J. and K.G.; writing—original draft preparation, B.C., W.J. and K.G.; writing—review and editing, B.C., W.J. and K.G.; visualization, B.C., W.J. and K.G.; supervision, B.C., W.J. and K.G.; project administration, R.U.; funding acquisition, R.U. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** The research was financed by the Poznan University of Technology financial resources for the statutory activity. The number of projects: 0712/SBAD/5166 and 0712/SBAD/5180.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Nomenclature

GUS	Polish Office of Statistics
GIOŚ	Chief Inspectorate of Environmental Protection
CO	carbon monoxide
CO <sub>2</sub>	carbon dioxide
NO	nitrogen oxide
NO <sub>x</sub>	nitrogen oxides
OGC	gasoline organic compounds
PM	particulate matter
Λ	air-fuel equivalence ratio
E <sub>ave</sub>	average harmful substances emissions of the heating boiler
E <sub>40%</sub>	emissions of harmful substances to 40% of the nominal power of the heating boiler
E <sub>20%</sub>	emissions of harmful substances to 20% of the nominal power of the heating boiler
E <sub>10%</sub>	emissions of harmful substances to 10% of the nominal power of the heating boiler
T <sub>1</sub>	water inlet measurement temperature point
T <sub>2</sub>	water outlet measurement temperature point




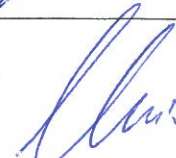
## References

1. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products. 2009, L285/10–L285/35. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0125> (accessed on 15 March 2021).
2. Khomenko, S.; Cirach, M.; Pereira-Barboza, E.; Mueller, N.; Barrera-Gómez, J.; Rojas-Rueda, D.; de Hoogh, K.; Hoek, G.; Nieuwenhuijsen, M. Premature mortality due to air pollution in European cities: A health impact assessment. *Lancet Planet. Health* **2021**. [CrossRef]
3. Graboś, A.; Żymankowska-Kumon, S.; Sadlok, J.; Sadlok, R. *Counteracting Low Emissions in Dense Residential Areas*; Sadlok, R., Ed.; Association for Energy Efficiency and the Development of Renewable Energy Sources “HELIOS”: Bochnia, Poland, 2014.
4. World Health Organization. *Health Effects of Particulate Matter, Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia*; World Health Organization: Copenhagen, Denmark, 2013.

5. Wang, J.; Zhou, Z.; Zhao, J.; Zheng, J.; Guan, Z. Towards a cleaner domestic heating sector in China: Current situations, implementation strategies, and supporting measures. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *152*, 515–531. [[CrossRef](#)]
6. Concha-Barrrientos, M.; Nelson, D.; Driscoll, T.; Steenland, N.; Punnett, L.; Fingerhut, M.; Prüss-Üstün, A.; Leigh, J.; Tak, S.; Corvalan, S. Selected Occupational Risk Factors. In *Comparative Quantification of Health Risks*; Ezzati, M., Lopez, A., Rodgers, A., Murray, C., Eds.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2004; pp. 1651–1801.
7. Kurc, B.; Lijewski, P.; Rymaniak, Ł.; Fuć, P.; Pięłowska, M.; Urbaniak, R.; Ciupek, B. High-Energy Solid Fuel Obtained from Carbonized Rice Starch. *Energies* **2020**, *13*, 4096. [[CrossRef](#)]
8. Judt, W. Numerical and Experimental Analysis of Heat Transfer for Solid Fuels Combustion in Fixed Bed Conditions. *Energies* **2020**, *13*, 6141. [[CrossRef](#)]
9. Ciupek, B.; Judt, W.; Urbaniak, R.; Kłosowiak, R. The emission of carbon monoxide and nitrogen oxides from boilers supplied by a pellet under the influence of changes in the air-fuel equivalence ratio. *J. Ecol. Eng.* **2019**, *20*. [[CrossRef](#)]
10. Ciupek, B. Study on hard coal combustion in heating boilers equipped with a steam-fed afterburning chamber. *Chem. Ind.* **2020**, *1*, 69–74. [[CrossRef](#)]
11. Ciupek, B.; Gołoś, K. Concentration of nitrogen oxides when burning wood pellets of various origins. *J. Ecol. Eng.* **2020**, *21*, 229–233. [[CrossRef](#)]
12. Statistics Poland Energy Consumption in Polish Households in 2018. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/environment-energy/energy/energy-consumption-in-households-in-2018,2,5.html> (accessed on 15 March 2021).
13. Wu, S.; Zheng, X.; Khanna, N.; Feng, W. Fighting coal—Effectiveness of coal-replacement programs for residential heating in China: Empirical findings from a household survey. *Energy Sustain. Dev.* **2020**, *55*, 170–180. [[CrossRef](#)]
14. Kazakevicius, E.; Schipper, L.; Meyers, S. The residential space heating problem in Lithuania. *Energy Policy* **1998**, *26*, 831–858. [[CrossRef](#)]
15. Gaigalis, V.; Skema, R. Analysis of fuel and energy transition in Lithuanian households sector and its sustainable development in compliance with the EU policy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *37*, 273–287. [[CrossRef](#)]
16. Barma, M.C.; Saidur, R.; Rahman, S.M.A.; Allouhi, A.; Akash, B.A.; Sait, S.M. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *79*, 970–983. [[CrossRef](#)]
17. Jaworek, A.; Sobczyk, A.T.; Marchewicz, A.; Krupa, A.; Czech, T. Particulate matter emission control from small residential boilers after biomass combustion. A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *137*, 110446. [[CrossRef](#)]
18. Ye, Y.; Qiu, D.; Wang, H.; Tang, Y.; Strbac, G. Real-Time Autonomous Residential Demand Response Management Based on Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Learning. *Energies* **2021**, *14*, 531. [[CrossRef](#)]
19. Lee, C.; Jung, D.E.; Lee, D.; Kim, K.H.; Do, S.L. Prediction Performance Analysis of Artificial Neural Network Model by Input Variable Combination for Residential Heating Loads. *Energies* **2021**, *14*, 756. [[CrossRef](#)]
20. Leadership of Chief Inspectorate of Environmental Protection Air Quality—Measurement Data. Available online: <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current> (accessed on 15 March 2021).
21. Polish Committee for Standardization. *EN 303-5:2012 Heating Boilers—Part 5: Heating Boilers for Solid Fuels, Manually and Automatically Stocked, Nominal Heat Output of up to 500 kW—Terminology, Requirements, Testing and Marking*; Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2012.
22. Ministry of Energy. *Journal of Laws of Poland, Is. 1893*; Ministry of Energy: Warsaw, Poland, 2018.
23. eSterownik.pl. Available online: <https://esterownik.pl/> (accessed on 15 March 2021).
24. European Commission. *Commission Regulation (EU) 2015/1189—of 28 April 2015—Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Solid Fuel Boilers*; European Commission: Brussels, Belgium, 2015.
25. Institute of Meteorology and Water Management Institute of Meteorology and Water Management. Available online: <https://danepubliczne.imgw.pl/> (accessed on 15 March 2021).
26. Statistics Poland Environment. 2019. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/environment-energy/environment/environment-2019,1,11.html> (accessed on 22 May 2021).
27. Gołoś, K.; Ciupek, B.; Judt, W.; Urbaniak, R. Impact of replacement of solid fuel heating boilers on air quality in Poland in 2000–2020. *Chem. Ind.* **2021**, *100*, 486–489. [[CrossRef](#)]





**Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej**

**Bartosz Ciupek, Wojciech Judt, Karol Gołoś, Rafał Urbaniak, Analysis of low-power boilers work on real heat loads: A case of Poland, Energies - 2021, vol. 14, no. 11 s. 3101-1-13 DOI: 10.3390/en14113101**

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Opracowanie koncepcji i metodyki realizacji badań. Zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie wniosków końcowych, wsparcie merytoryczne.	75%	
2.	Wojciech Judt	Redakcja tekstu, wsparcie merytoryczne.	10%	
3.	Karol Gołoś	Redakcja tekstu, wsparcie merytoryczne.	10%	
4.	Rafał Urbaniak	Opracowanie koncepcji pracy badawczej. wsparcie merytoryczne	5%	

## Article

# Effect of Hard Coal Combustion in Water Steam Environment on Chemical Composition of Exhaust Gases

Bartosz Ciupek <sup>1</sup>, Karol Gołoś <sup>1,\*</sup>, Radosław Jankowski <sup>1</sup> and Zbigniew Nadolny <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Fuels and Renewable Energy, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Institute of Thermal Energy, Poznan University of Technology, 60-965 Poznan, Poland; bartosz.ciupek@put.poznan.pl (B.C.); radoslaw.jankowski@put.poznan.pl (R.J.)

<sup>2</sup> Department of High Voltage and Electrotechnical Materials, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Institute of Power Engineering, Poznan University of Technology, 60-965 Poznan, Poland; zbigniew.nadolny@put.poznan.pl

\* Correspondence: karol.golos@doctorate.put.poznan.pl; Tel.: +48-61-665-22-14

**Abstract:** This academic paper revolves around the results of research on the change in emission parameters of the used heating boiler following the introduction of the overheated water stream, which had an impact on different emission parameters. The research results provide an insight into the hard coal combustion process, which had a significant impact on the change in the chemical composition of exhaust gases: it contributed to the lower mass concentration of the emitted dust and black carbon (PM) as well as nitric oxides (NO<sub>x</sub>) while, at the same time, playing a significant role in increasing the mass concentration of the emitted carbon oxide (CO). Two types of devices were used for the purposes of conducting the research at hand: a boiler with an automatic fuel feeding system with one combustion chamber and a boiler with a combustion chamber and an afterburning chamber fitted over it. Apart from the measurements of mass concentration of the emitted harmful substances, the research also focused on measurements of temperature inside the combustion and afterburning chambers, as well as the temperature of exhaust gases and their oxygen content. As part of the research, water steam was introduced to the combustion and afterburning chambers at the flow rate of 0.71 kg/h and 3.60 kg/h for boilers operating at a minimum power of 30% and a nominal power of 100%. An original steam generator with an overheated water steam production range from 0.71 kg/h to 3.60 kg/h was used to create and feed the water steam. The efficiency of the combustion process was calculated using the obtained results for each operating configuration of a given boiler.

**Keywords:** low-power boiler; hard coal; water steam; harmful substances; emission



**Citation:** Ciupek, B.; Gołoś, K.; Jankowski, R.; Nadolny, Z. Effect of Hard Coal Combustion in Water Steam Environment on Chemical Composition of Exhaust Gases. *Energies* **2021**, *14*, 6530. <https://doi.org/10.3390/en14206530>

Academic Editors: Paweł Ocoń, Piotr Cisek and Constantine D. Rakopoulos

Received: 9 August 2021

Accepted: 9 October 2021

Published: 12 October 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Research on modern technologies that focus on lowering the emission of harmful substances from solid fuel heating boilers is still a widely discussed scientific topic [1]. The great number of papers implements a very similar scientific approach of examining the solid fuel heating boiler system as a technical object affecting human beings and the environment [2]. Scientific publications [3–5] propose that, in terms of thermodynamics, a solid fuel heating boiler is considered a closed heterogeneous system with a strong impact on the external environment, depending on the physical and chemical properties of the fuel used. Moreover, those parameters have a significant impact on the change in emission parameters of the boiler.

The approach adopted by the researchers examines the problem solely with regard to the emission of harmful substances, and not in terms of chemical parameters of the combustion process. While analyzing the most renowned publications on the emission of harmful substances from heating boilers, it's possible to ascertain that the research problem related to the analysis of the chemism of the solid fuel combustion process is not a frequently taken up topic [6,7]. The previously published publications [8,9] have discussed

the impact of the chemical composition of the burnt fuels on the emission of harmful substances from boilers. In addition to that, the earlier research used to focus on the effect of heating devices' construction methods on the emission of harmful substances and the combustion process occurring inside them [10]. The publications [11,12] conclude that the emission level of harmful substances is directly connected with the technical parameters of the devices as well as the technical parameters of the burnt fuel.

The publication [13] revolves around harmful substances emitted from heating devices that are not subject to the environmental register. It concludes that the location of heat distribution buildings has a significant impact on the amount of harmful substances emitted in that area.

The researchers calculated that the dust concentration in exhaust gases emitted from boilers greatly exceeds values indicated in standards and directives. It is worth pointing out the scale of the problem in terms of air quality in Poland; that is, dust particles, in particular solid particles characterized mostly as PM 2.5 and PM 10, are very harmful to humans because they demonstrate strong cancerogenic properties. What's more, the statistical data [14] indicates that 84% of the total particle emission of PM 2.5 originates from fuel combustion, whereas as much as 49% can be attributed to the combustion of solid fuels in households. The total amount was assessed to be at the level of 59,850 tons in 2019 for PM 2.5 and 89,620 tons in 2019 for PM 10.

The obtained results motivate scientists to deepen their research on the reduction of dust and black carbon emissions from household heating sources. The scale of the problem related to the emission of harmful substances in Poland, resulting from the use of solid fuel heating boilers, shows the dire need of implementing modern technologies which will significantly reduce the amount of dust emitted to the environment. Currently, research is also being conducted on the factual operation of heating boilers, with special attention paid to the problem of lowering the amount of the emitted harmful substances. The implementation of the suggested solutions may contribute to reduced emissions [15].

The previously conducted research proves that the technical parameters of fuel bear a strong effect on the variability of mass concentration of PM, CM and NO<sub>x</sub> in exhaust gases. Moreover, research on co-combustion of coal-derived fuels with the use of woody and non-woody biomass shows convergent processes regarding the emitted harmful substances. It allows for analogous research methods to be implemented in order to examine heating devices that use such fuels [16].

Further research on changes in the quality of the combustion process of low-power heating boilers after the introduction of water steam is the continuation of the previous research [17]. So far, there have been satisfactory grounds that prove the reduced emission of harmful substances generated by solid fuel heating boilers fueled with hard coal. On the grounds of the previous research [18], it was concluded that such parameters have the greatest effect on physical and chemical aspects of combustion. Heat and emission of the boiler were analyzed during its operation at nominal power without water steam and with water steam in the amount of 0.71 kg/h, with 3.60 kg/h being introduced to the combustion and afterburning chamber of two different boilers.

The obtained results were presented in collective tables and in drawings, which demonstrate the course of emission in time and mass distribution with reference to the oxygen concentration in exhaust gases.

On the basis of the previously conducted research, a significant reduction in PM emission and a slight reduction in NO<sub>x</sub> were observed, with simultaneous and rapid increase in the mass concentration of the emitted CO. The high level of the CO emission and detection of hydrogen (H<sub>2</sub>) in exhaust gases may be evidence of coal gasification after the introduction of water steam. Carbon monoxide is formed in the first stage of the Bosch reaction, i.e., the reaction of elemental carbon (e.g., incandescent coke) with water steam (hydrogen is also formed in the above reaction). The following chemical reaction reflects this mechanism:



On its basis, it is possible to conclude that, following the introduction of water steam to the combustion chamber, CO is created from carbon (e.g., originating from soot) affected by steam water, and that this results in the reduction in the emitted PM with a simultaneous increase in the emission of CO. It means that the introduction of an additional thermodynamic factor to the combustion chamber causes the reorganization of the combustion process. A visible reduction in the oxygen content in exhaust gases would then be one of the effects of a worse quality of the combustion process, however, in the case of the research conducted, changes in the amount of oxygen created from the combustion process were not observed. It may prove that water steam introduced to the combustion chamber did not replace oxygen, but it only became an additional reactive factor in the combustion process. Other possible chemical reactions, which may occur during the introduction of water steam to the combustion chamber, are as follows:



It may prove a significant increase in the amount of the emitted carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and CO, which emission, when compared to the normal operation of the boiler, increases by as much as 200% in comparison to the standard operation of the burner, and the detection of a significantly higher content of hydrogen in exhaust gases in comparison to the standard operation of the boiler. On the basis of the obtained results, it was concluded that many chemical reactions occur during the coal combustion process in heating boilers while feeding water steam to the combustion chamber, and their joint effect is an obvious reduction in the amount of the emitted PM and the simultaneous increase in the CO emission [19].

It should be mentioned that in the energetics aspect, adding water steam to the combustion process may contribute to efficiency reduction, because it makes a ballast and consumes energy from the combustion process. Although the tests were carried out for a system without heating recovery, the main type of heating boiler on the market is condensing boilers, which recover a significant amount of thermal energy from the water steam contained in exhaust gases, and the efficiency impact is negligibly small.

An alternative to the research conducted can be the carbon oxide conversion process, during which its emission significantly decreases due to the oxidation of CO to CO<sub>2</sub>. It is possible to obtain better parameters of heat exchange between exhaust gases and the work factor because of the reduction in the CO level, and that can bear a positive effect on the efficiency of a given heating device. It was also observed that the introduction of additional chemical substances to the flame area resulted in the nullification of part of its energy, as well as the reduction (by as much as approximately 250 °C) of the temperature inside the combustion chamber [20]. A lower flame temperature causes changes in emission parameters and it results in, for instance, a lower amount of the emitted PM and a slight reduction in the emitted NO<sub>x</sub>. Moreover, a significant increase in the H<sub>2</sub> emission is detected during the combustion process in comparison to the combustion process without the introduction of water steam. The transmission of heat, created during the combustion process, from the flame to the water steam introduced to the combustion chamber limits the participation of the thermal mechanism of nitric oxide creation, thus causing slight decrease in the NO<sub>x</sub> emission. Such a mechanism, in terms of low-temperature solid fuel boilers, has an insignificant effect on the amount of nitric oxides created during the combustion process because it is the fuel mechanism that has the greatest percentage of participation [21–23].

The latest research works related to the reduction of harmful substance emissions from the combustion processes tend to focus on the modification of combustion processes in terms of their reorganization and secondary air supply, as well as the insertion of additives that may generate chemical reactions in the area of high temperatures, resulting in the reduction of exhaust gas compounds [24–26]. Research associated with the techniques

of harmful substance reduction from the combustion processes carried out in real time gives genuine evidence of assumption correctness [27], however, the modern development of numerical technology provides possibilities for highly precise simulation, taking into account many input data and factors for the purpose of estimating emissions from fuel combustion processes in many heating boiler types [28–30].

The research primarily aimed to analyze the thermodynamic parameters in the case of boilers operating without water steam, and with water steam added to the combustion and afterburning chamber. The use of water steam in the energy industry has recently taken on a unique importance. Thanks to the ease of obtaining  $H_2O_{(g)}$ , water steam can be used in energy processes in an optimal and economic way as a widely available waste agent (low-energy, low temperature and pressure), and not only in combustion [31], but also torrefaction, for which the end product is biochar. In turn, it can be used further, for instance, as a substitute for fossil fuels [32].

## 2. Materials and Methods

The research at hand was divided into two stages, which constitute individual research cycles based on: heating device type, boiler power and location, and water steam flow rate. The first stage examined the emission level of harmful substances for the Heiztechnik Q EKO 15 boiler operating at both minimum and nominal power, automatically fueled by hard coal, with and without the introduced water steam. The second stage examined the emission level of harmful substances for the KN-20 boiler operating at both minimum and nominal power, automatically fueled by hard coal, with and without the water steam introduced to the combustion and afterburning chambers. The research program is presented in the following Table 1.

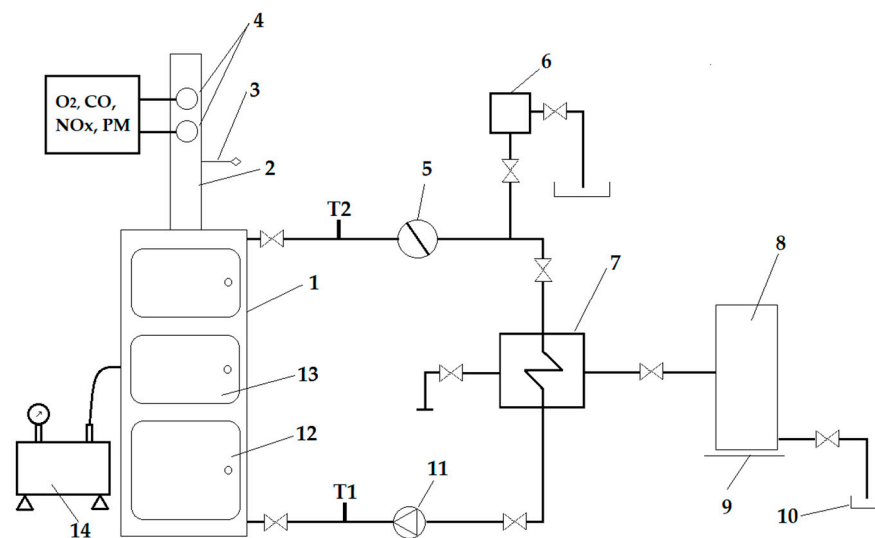
**Table 1.** Program of the conducted research.

Measurement Cycle	Type of Heat Devices	Type of Boiler Operation	Value of Water Steam Stream	Place of Water Steam Stream	
1.	Heiztechnik Q EKO 15	30%	–	Combustion Chamber	
2.		100%			
3.		30%	0.71 kg/h		
4.		100%			
5.		30%	3.60 kg/h		
6.		100%			
7.	KN-20	30%	–	Combustion Chamber	
8.		100%			
9.		30%	0.71 kg/h		
10.		100%			
11.		30%	3.60 kg/h		
12.		100%			
13.		30%	0.71 kg/h		Steam-fed Afterburning Chamber
14.		100%			
15.		30%	3.60 kg/h		
16.		100%			

The boiler worked with the assumed power (minimum or nominal) during each measurement cycle. The operation was being recorded for approximately 3 h while steam water was supplied to the combustion or afterburning chamber. Before each of the successive measurement cycles, there was a stabilization period for the boiler operation conditions for every selected power setting, which was recorded for approximately 1 h. At intervals between individual test cycles, the thermal operation of the boiler was stabilized (exhaust gases and temperature in the combustion or afterburning chamber) due to the combustion process and fuel consumption. Measurement data were registered at a research station

equipped with a PC and a National Instruments measurement system. The computer collected measurement data from the exhaust gas analyzers, and the measurement system, developed using the LabVIEW software, was responsible for registering the occurring temperatures. Mass concentration of CO, NO<sub>x</sub> and PM was calculated into mg/m<sup>3</sup> for 10% of O<sub>2</sub> in exhaust gases, according to the low-power heating boiler examination method set forth in the standard [33–35]. The temperature of the exhaust gases is the mean value calculated from the measurements taken by five thermocouples placed inside the measurement chimney. The temperature inside the combustion chamber was registered at the depth of approximately 30 cm from the boiler's front cover with a sensor placed at a distance of approximately 10 cm from the burner's surface. The temperature inside the afterburning chamber was registered at a distance of approximately 10 cm below the stream of the water steam. Boiler fuel consumption was established by measuring the mass of fuel before and after the research was concluded. The stream mass of the burnt fuel was determined on the basis of the fuel used during the research.

Example of a research station equipped with a KN-20 heating boiler connected to the afterburning chamber via a steam generator. (Figure 1)



**Figure 1.** Scheme of test stand: 1—solid fuel heating boiler, 2—chimney, 3—measurement temperature, 4—measurement points of pollutants, 5—water flow meter, 6—expansion tank, 7—heat exchanger, 8—water tank, 9—weight scale, 10—outflow, 11—water pump, 12—combustion chamber, 13—steam-fed afterburning chamber, 14—water steam generator.

### 2.1. Heat Devices

The investigations were carried out on two low-power heating boilers fueled with hard coal. The coal-fueled heating boiler (KN-20 by Elektrorecykling, Nowy Tomyśl, Polska) is a low-temperature heating boiler with the nominal power output of 20 kW complaint, with class 5 of the environment protection requirements set forth in the PN-EN 303-5:2012 standard. Its design is based on a smoke tube heat exchanger and the range of obtainable thermal power is between 6–20 kW. The boiler was equipped with a standard combustion chamber and steam-fed afterburning chamber. The afterburning chamber is located directly above the combustion chamber and connected with an exhaust gas channel, additionally equipped with ceramic screens (without cooling). In the case of boiler operation with minimal and nominal power, hot exhaust gases and the flame flow through the necking connection of both chambers, resulting in a fully filled afterburning chamber with an exhaust gas and a flame. For operation with nominal power of the boiler (20 kW), fuel consumption was recorded as approximately 2.43 kg/h and the combustion air demand was recorded as approximately 18.59 m<sup>3</sup>/h. For operation with minimal power



of the boiler (6 kW), fuel consumption was recorded as approximately 0.73 kg/h and the combustion air demand was recorded as approximately 5.58 m<sup>3</sup>/h.

The second heating boiler tested was Q EKO 15 by Heiztechnik, Skarszewy, Poland (automatic fuel supply) of the nominal power output of 15 kW. The heating boilers were fueled with hard coal of the grain size from 5 to 25 mm operating in the range of 4.5 to 15 kW. The fundamental difference in both heating boilers is the fact that one of them meets the class 3. PN-EN 303-5:2012 requirement [33] and the other one is an out-of-class appliance. Both heating boilers differ in the design of their combustion chambers. A microchip controller governs the operation of both heating boilers. The boiler was equipped only with a standard combustion chamber. For operation with nominal power of the boiler (15 kW), fuel consumption was recorded as approximately 1.83 kg/h and the combustion air demand was recorded as approximately 13.94 m<sup>3</sup>/h. For operation with minimal power of the boiler (4.5 kW), fuel consumption was recorded as approximately 0.55 kg/h and the combustion air demand was recorded as approximately 4.18 m<sup>3</sup>/h. Figure 2 presents the Q EKO 15 boiler (left) and KN-20 boiler (right).



**Figure 2.** Heating devices used in tests. On left side: Q EKO 15; on right side: KN-20.

## 2.2. Water Steam Device

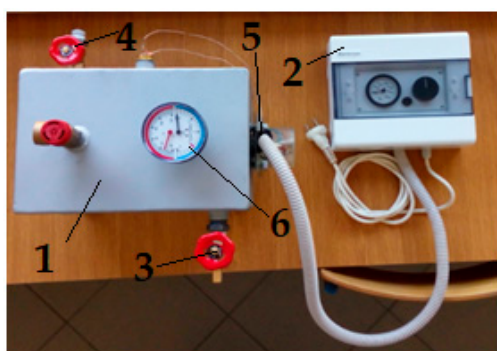
A water steam generator was designed and built by the researchers in question in order to conduct the research at hand. The steam generator was constructed according to the WUDT-UC-WO-O/00:01.2005 standard [36] of the Technical Supervision Office. It outlines the requirements set for pressure vessels by virtue of the Polish law. The guidelines are not obligatory, however, they serve as good engineering practices and are considered design guidelines for pressure devices.

A real model of the device used in further research was manufactured as a steam generator system on the basis of calculations, and therefore was built using a pressure vessel and an electric heater. The operating parameters of the steam generator are presented in the following Table 2.

Additionally, a control system was installed in order to control the device's operation, which allows heating parameters of the heater to be changed and constant vaporization parameters to be maintained. Apart from that, the vessel was equipped with measuring devices, which were fitted with additional thermometers to control the water temperature and the created water steam. Moreover, a water inlet was fixed to let fresh water into the vessel after the already present water vaporized. The device, along with its elements and the description of each element, is presented in the following Figure 3.

**Table 2.** Technical parameters of the designed steam generator.

Type of Parameter	Volume of Parameter
minimal volume of water [kg]	3.00
nominal volume of water [kg]	10.00
minimal steam pressure [bar]	2.50
maximal steam pressure [bar]	4.00
minimal steam temperature [°C]	110.00
maximal steam temperature [°C]	130.00
minimal steam flow [kg/h]	0.71
maximal steam flow [kg/h]	3.60

**Figure 3.** Water steam device used in experimental research: 1—pressurized tank, 2—control system, 3—steam outlet, 4—water inlet, 5—electric heater, 6—pressure and temperature measuring device.

### 2.3. Chemical Parameters of Fuel

The authors used hard coal (eco-pea coal) to conduct the research. The fuel was in the as-received condition and a prior technical analysis was performed according to the standard [33] for a more accurate determination of its parameters. The obtained results are presented in Table 3.

**Table 3.** Ultimate analysis of hard coal used during the research.

Type of Measurement	Hard Coal	Hard Coal limits [21]
Free moisture %	8.10	—
Air-dry fuel moisture %	3.00	—
Total moisture %	11.10	≤11
Ash content %	3.60	2 to 7
Volatiles %	36.60	>30
C %	78.10	—
S %	0.60	—
H <sub>2</sub> %	4.22	—
N <sub>2</sub> %	1.37	—
O <sub>2</sub> %	9.29	—
High calorific value MJ/kg	30.57	—
Low calorific value MJ/kg	29.57	>28

### 2.4. Emission Measurement Devices

The measurements were carried out with the use of portable exhaust gas analyzers equipped with electrochemical measuring cells. The first device was the Testo 350-S (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) in a two-component configuration—a controller and an analyzer. The analyzer was fitted with an O<sub>2</sub> cell with a volume measurement range of 0–25% and the error margin of ±0.8%, which allowed the level of oxygen in the flue gas and H<sub>2</sub> cell to be recorded in the measurement range of 0–1000 ppm and the margin of error ±0.5 ppm. The Testo 350-S was equipped with an NO cell with a

measurement range of 0–3000 ppm and the margin of error of  $\pm 1.5$  ppm. Additionally, the temperature of the flue gas was measured with the accuracy of  $\pm 1$  °C.

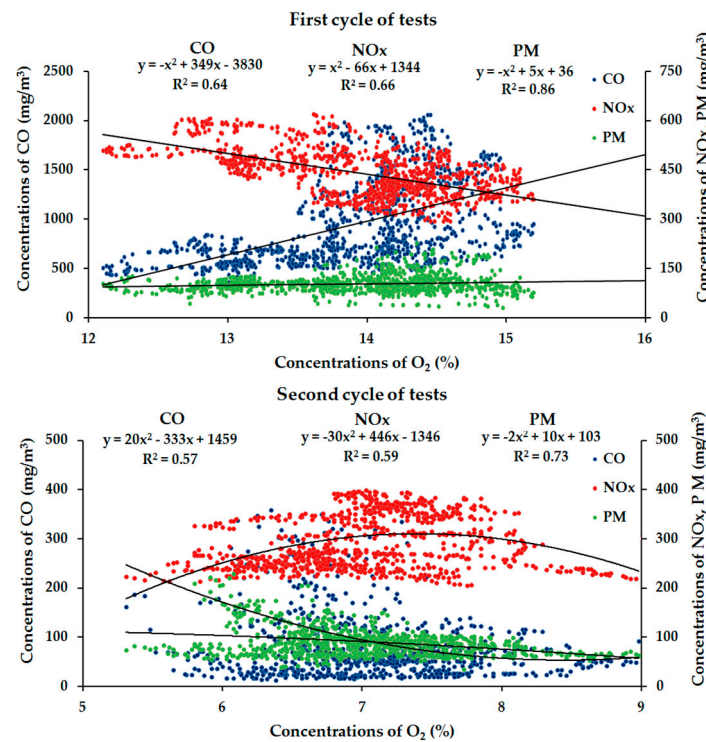
The other device used in the research was the Testo 380 particle analyzer (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) coupled with a Testo 330-2 LL flue gas analyzer (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) that served as controllers fitted with a display. The Testo 380 was used to measure the particulate matter within the range of 0–300 mg/m<sup>3</sup> and the margin of error of  $\pm 5$  mg/m<sup>3</sup>. The use of both devices at the same time in the form of a joint unit allowed the authors to measure both the concentration of carbon monoxide CO (0–8000 ppm) and the concentration of nitrogen oxides NO<sub>x</sub> (0–3000 ppm). Figure 4 presents the aforementioned measurement devices.



**Figure 4.** Exhaust gas analyzers used in tests. On left side: Testo 350s; on right side: Testo 380 and Testo 330-2 LL.

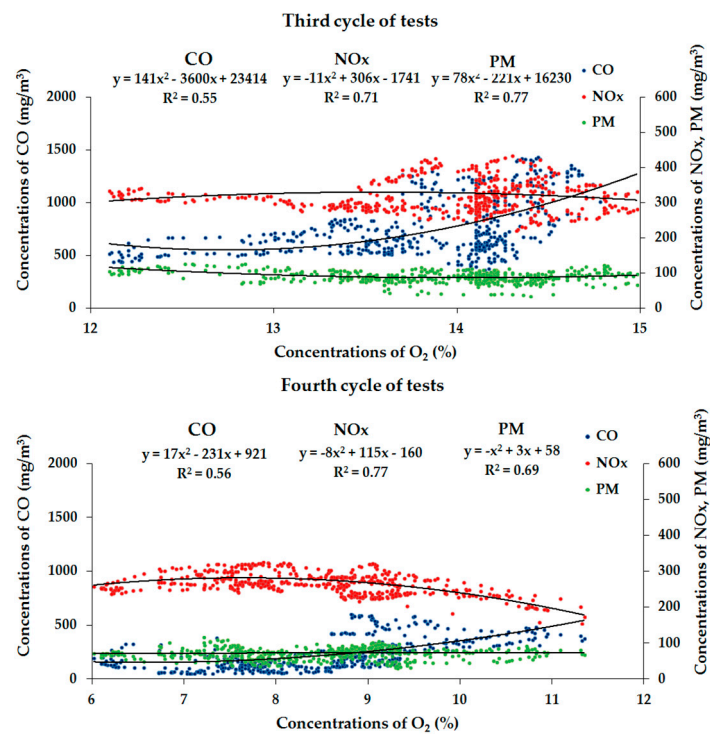
### 3. Results and Discussion

The first and second cycle of tests showed that the CO emission didn't exceed the average range from 100 mg/m<sup>3</sup> to 946 mg/m<sup>3</sup>, the average range of NO<sub>x</sub> emission was from 295 mg/m<sup>3</sup> to 443 mg/m<sup>3</sup> and the average PM emission was from 90 mg/m<sup>3</sup> to 103 mg/m<sup>3</sup>. There were traces of the H<sub>2</sub> emission (from 0.68 mg/m<sup>3</sup> to approximately 1.12 mg/m<sup>3</sup> on average), which could result from the content of the substance in the fuel. The average exhaust gas temperature was from approximately 153 °C to approximately 230 °C. The average temperature inside the combustion chamber for the minimal power was 730 °C, while for the boiler operating at nominal power the average temperature was 880 °C. The average efficiency range of the combustion process was from approximately 87% to approximately 91%. The results obtained clearly show that the boiler meets the class 3 requirements of the standard, which defines the border values for the CO and PM emissions from burning fossil fuels related to boilers operating at nominal power of  $\leq 50$  kW with automatic fuel supply, which comes to 3000 mg/m<sup>3</sup> for CO and 150 mg/m<sup>3</sup> for PM, respectively [33]. Figure 5 shows mass distribution of basic harmful substances emitted during the Q EKO 15 boiler operation at minimum and nominal power. The following charts show estimated equations for trend lines depicting the approximate emission distribution of harmful substances with reference to the oxygen content in exhaust gases.



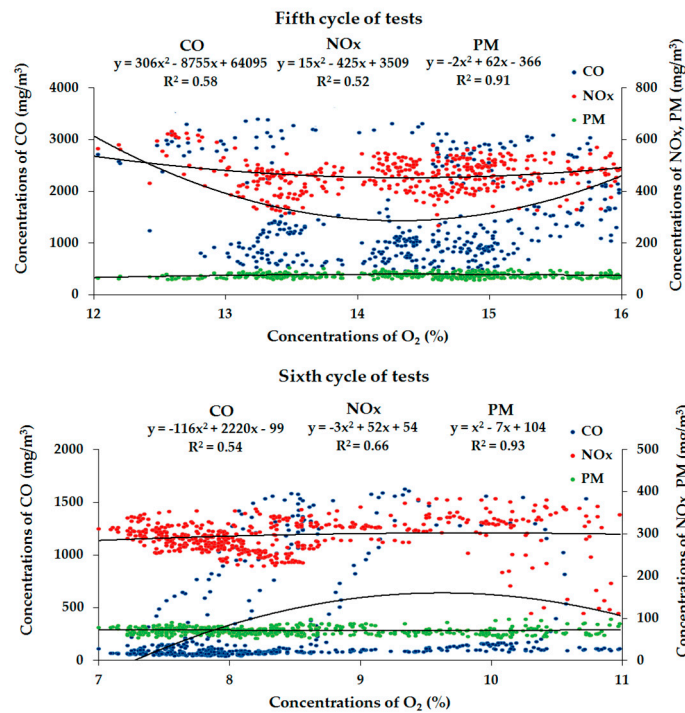
**Figure 5.** Mass distribution of harmful substances to the remaining oxygen for the first and second cycle of tests.

In the case of the third and fourth cycle of tests, it was observed that the introduction of water steam to the combustion chamber at the flow rate of  $0.71 \text{ mg/m}^3$  resulted in the CO emission lowering by approximately 17% for the boiler operating at minimum power, but for the boiler operating at nominal power it resulted in an increase in the amount of the emitted CO by approximately 156%. Dust emission was lower in relation to the normal boiler operation by approximately 13% to 19%, regardless of the boiler power. The NO<sub>x</sub> emission decreased by approximately 4% to 27% regardless of the boiler power. Hydrogen was detected in exhaust gases in the average amount of approximately  $5.62 \text{ mg/m}^3$  to  $8.87 \text{ mg/m}^3$ . The efficiency of the combustion process decreased by the maximum amount of approximately 4%. The average exhaust gas temperature was from the approximately  $149 \text{ }^\circ\text{C}$  to approximately  $215 \text{ }^\circ\text{C}$ . While feeding the water steam to the combustion chamber, the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  (the temperature was approximately  $716 \text{ }^\circ\text{C}$ ) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately  $46 \text{ }^\circ\text{C}$  (the temperature was approximately  $834 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Decreased temperature inside the combustion chamber had a positive effect on the lowering of the NO<sub>x</sub> content created during thermal processes. Figure 6 shows the mass distribution of basic harmful substances emitted during boiler operation at minimum and nominal power. The following charts show estimated equations for trend lines depicting the approximate emission distribution of harmful substances with reference to the oxygen content in exhaust gases.



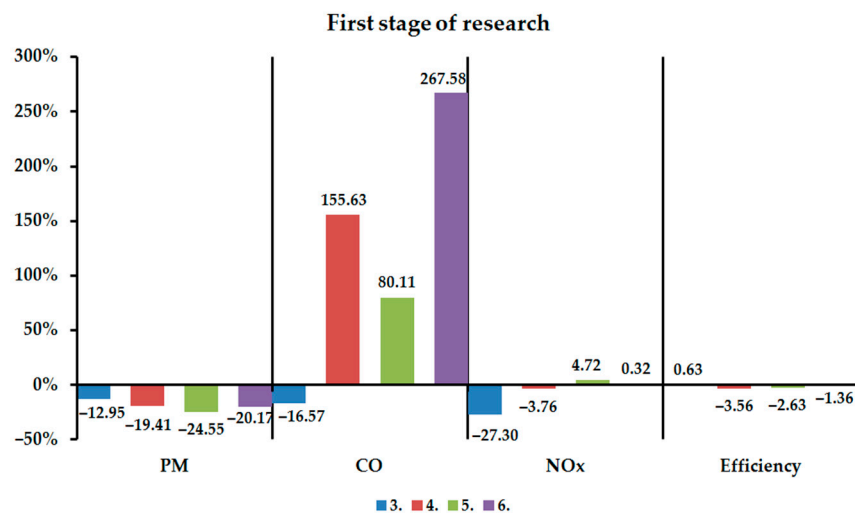
**Figure 6.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the third and fourth cycle of tests.

In the case of the fifth and sixth cycle of tests, it was observed that the amount of the emitted CO, in comparison to the standard combustion process, increased by approximately 80% to 268%, on average. The introduction of water steam to the combustion process resulted in a lower PM emission by approximately 20% to 25%, on average. The NOx emission, in comparison to emission from the unmodified combustion process, increased to a maximum amount of approximately 5%. The increase in the emitted nitric oxides could be the result of an additional amount of energy introduced along with the maximum amount of water steam fed to the combustion chamber. The efficiency of the combustion process decreased by an average amount of approximately 3%. H<sub>2</sub> was detected in exhaust gases in amounts from 5.25 mg/m<sup>3</sup> to approximately 18.38 mg/m<sup>3</sup>. The average exhaust gas temperature was from approximately 145 °C to approximately 194 °C. The temperature inside the combustion chamber decreased by approximately 26 °C (the temperature was approximately 704 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately 86 °C (the temperature was approximately 794 °C). Figure 7 shows the mass distribution of basic harmful substances emitted during boiler operation at minimum and nominal power. The following charts show estimated equations for trend lines depicting the approximate emission distribution of harmful substances with reference to the oxygen content in exhaust gases.



**Figure 7.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the fifth and sixth cycle of tests.

The following Table 4 shows the results of individual test cycles for the first stage of research. Figure 8 shows graphical changes in the emission of harmful substances as well as the efficiency of the combustion process after supplying water steam to the combustion chamber at different flow rates. The values were obtained on the basis of a comparison of the average emission parameters of individual harmful exhaust gas components with the values obtained for the standard boiler operation at minimal and nominal power (cycle 1 and 2).

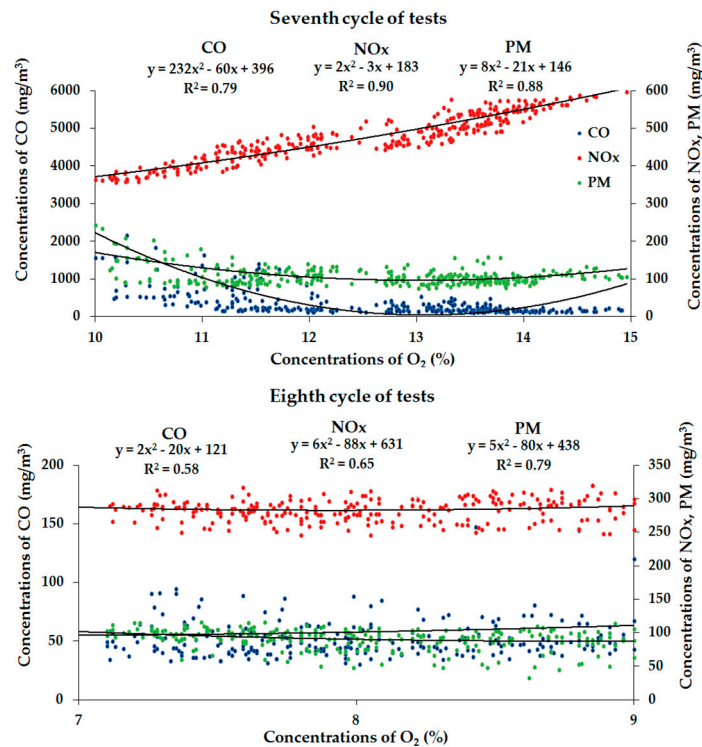


**Figure 8.** Changes in emission and efficiency parameters of the combustion process obtained for the first stage of research (cycles from 3 to 6).

Table 4. Results of the first stage of research.

Measurement Cycle	Measurement Value	CO mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>	PM mg/m <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	η %
1.	Average	946.35	443.18	102.84	0.68	87.12
	Median	762.00	436.50	99.00	0.66	84.81
	Dominant	516.00	399.00	86.00	0.61	84.12
	Minimum	300.00	295.00	31.00	0.22	78.52
	Maximum	2186.00	634.00	227.00	1.10	91.10
2.	Average	100.90	295.00	90.10	1.12	91.33
	Median	64.00	273.00	86.00	1.40	90.90
	Dominant	22.00	269.00	66.00	1.08	89.73
	Minimum	13.00	205.00	35.00	0.50	88.60
	Maximum	780.00	406.00	229.00	2.30	93.27
3.	Average	789.50	322.19	89.52	8.87	87.67
	Median	675.25	311.87	89.00	1.17	87.24
	Dominant	675.24	294.29	86.00	0.67	86.75
	Minimum	360.40	220.05	34.00	0.18	85.29
	Maximum	1564.60	523.78	127.00	45.10	90.24
4.	Average	257.93	283.92	72.61	5.62	88.08
	Median	198.06	268.13	74.00	1.28	89.01
	Dominant	73.20	233.83	81.00	0.83	88.87
	Minimum	54.75	197.17	31.00	0.11	83.11
	Maximum	722.81	386.91	117.00	16.89	90.39
5.	Average	1704.48	464.11	77.59	18.38	84.83
	Median	1323.04	470.43	77.00	1.49	84.50
	Dominant	1227.85	450.26	68.00	1.86	83.40
	Minimum	475.64	269.87	59.00	0.98	59.10
	Maximum	3921.38	598.05	108.00	93.21	91.80
6.	Average	370.89	295.93	71.93	5.25	90.09
	Median	107.45	167.00	71.00	1.31	90.38
	Dominant	60.55	174.00	69.00	1.22	90.34
	Minimum	48.25	114.15	54.00	0.56	87.00
	Maximum	1964.32	386.53	100.00	29.90	91.42

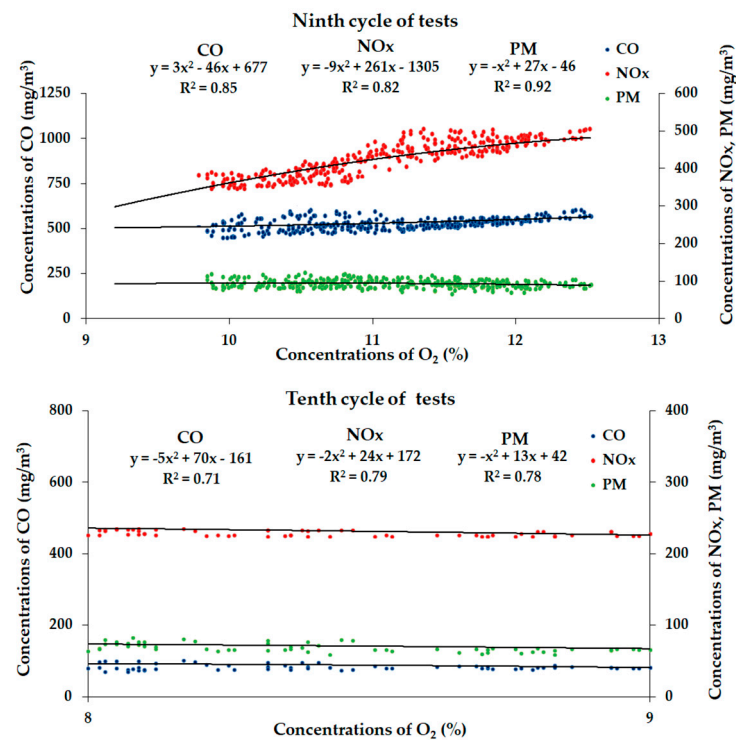
In the case of the seventh and eighth cycle of tests, it was observed that the CO emission was within the average range of 58 mg/m<sup>3</sup> to 516 mg/m<sup>3</sup>, however, the NO<sub>x</sub> emission was within the average range of 285 mg/m<sup>3</sup> to 479 mg/m<sup>3</sup>. The PM emission was within the average range of 93 mg/m<sup>3</sup> to 112 mg/m<sup>3</sup>. The H<sub>2</sub> emission was within the average range of up to 8 mg/m<sup>3</sup>. The average exhaust gas temperature was from approximately 114 °C to approximately 130 °C. The average temperature inside the combustion chamber for the minimal power was 820 °C, while for the boiler operating at nominal power the average temperature was 910 °C. The average temperature inside the afterburning chamber was 690 °C at minimal and 757 °C at nominal power conditions. The efficiency of the combustion process was within the average range, from 90% to 95%. Figure 9 shows the mass distribution of basic harmful substances emitted during the KN-20 boiler operation at minimum and nominal power. The following charts show estimated equations for trend lines depicting the approximate emission distribution of harmful substances with reference to the oxygen content in exhaust gases.



**Figure 9.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the seventh and eighth cycles of tests.

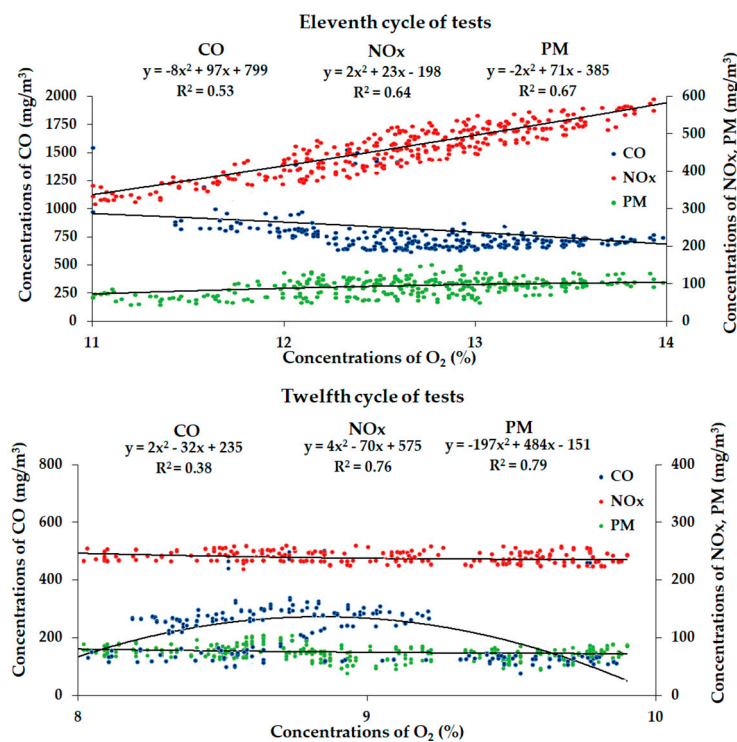
In the case of the ninth and tenth cycle of tests, it was observed that the introduction of water steam to the combustion chamber at the flow rate of 0.71 kg/h resulted in the increase in the emitted CO by approximately 58% for the boiler operating at nominal power, however, only a slight increase was observed in the case of the boiler operating at minimum power. Dust emission was lower in comparison to the nominal power of the boiler by approximately 17% for operation at minimum power, and by approximately 19% for operation at nominal power. Hydrogen was detected in exhaust gases in the average amount of approximately 3.46 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process increased by the maximum amount of approximately 2%. The average exhaust gas temperature was from approximately 120 °C to approximately 138 °C. The temperature inside the combustion chamber increased by approximately 8 °C (the temperature was approximately 828 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately 26 °C (the temperature was approximately 936 °C). The temperature in the afterburning chamber increased by approximately 2 °C (the temperature was approximately 692 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the afterburning chamber dropped by approximately 5 °C (the temperature was approximately 762 °C). Figure 10 shows the mass distribution obtained for the emission of harmful substances with reference to the oxygen content in the exhaust gases and the approximate equations for trend lines.





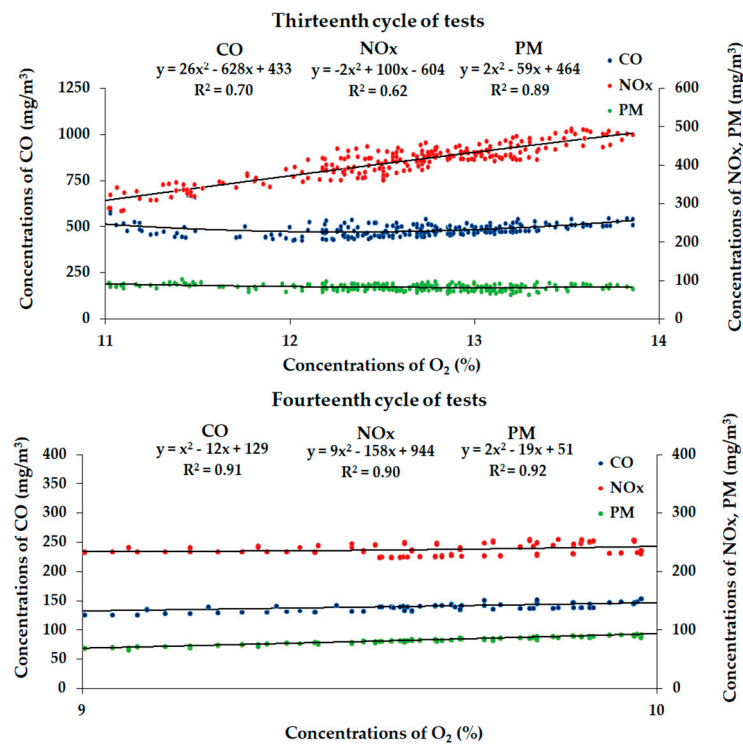
**Figure 10.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the ninth and tenth cycle of tests.

In the case of the eleventh and twelfth cycle of tests, it was observed that the introduction of water steam to the combustion chamber at the flow rate of 3.60 kg/h resulted in an increase in the emitted CO, from approximately 61% to approximately 243%. Dust emission was lower in comparison to the normal operation of the boiler by approximately 18%, regardless of the boiler power. The NO<sub>x</sub> emission decreased by approximately 4% to 16%. There was hydrogen detected in exhaust gases in the average amount of approximately 8.02 mg/m<sup>3</sup> to 9.17 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process in the case of the boiler operating at nominal power decreased by approximately 3%, and it didn't change for the boiler operating at minimum power. The average exhaust gas temperature was from approximately 124 °C to approximately 160 °C. The temperature inside the combustion chamber increased by approximately 14 °C (the temperature was approximately 834 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately 48 °C (the temperature was approximately 958 °C). The temperature in the afterburning chamber increased by approximately 10 °C (the temperature was approximately 700 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the afterburning chamber dropped by approximately 32 °C (the temperature was approximately 789 °C). Figure 11 shows the mass distribution obtained for the emission of harmful substances with reference to the oxygen content in the exhaust gases and the estimated equations for trend lines.



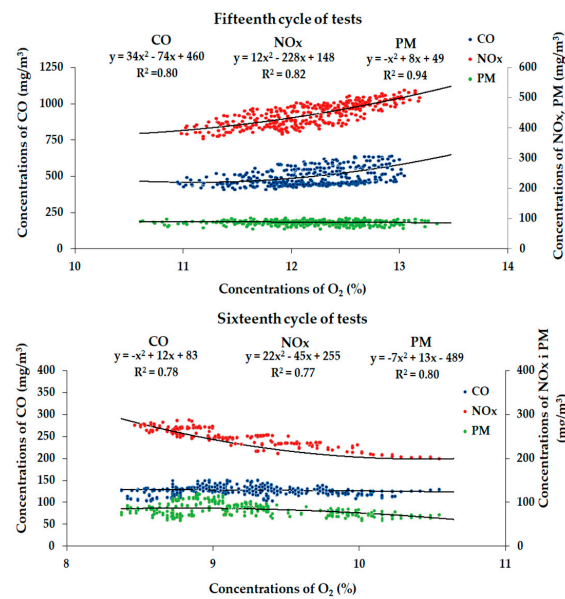
**Figure 11.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the eleventh and twelfth cycle of tests.

The thirteenth and fourteenth cycle of tests showed that the supply of water steam to the afterburning chamber at the flow rate of 0.71 kg/h resulted in a decrease in the emitted CO by approximately 6%, and for the boiler operating at nominal power, the CO emission increased by approximately 142%. Dust emission was lower by approximately 26%, in comparison to the normal operation of the boiler, for the boiler operating at minimum power, and by approximately 10% for the boiler operating at nominal power. The NO<sub>x</sub> emission decreased by approximately 16%. Hydrogen was detected in exhaust gases in the average amount of approximately 5.34 mg/m<sup>3</sup> to 8.02 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process in the case of the boiler operating at nominal power increased by approximately 2%, and it decreased for the boiler operating at minimum power by approximately 3%. The average exhaust gas temperature was from approximately 128 °C to approximately 155 °C. The temperature inside the combustion chamber increased by approximately 6 °C (the temperature was approximately 826 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately 20 °C (the temperature was approximately 930 °C). The temperature in the afterburning chamber increased by approximately 8 °C (the temperature was approximately 698 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the afterburning chamber dropped by approximately 28 °C (the temperature was approximately 785 °C). Figure 12 shows the mass distribution obtained for the emission of harmful substances with reference to the oxygen content in the exhaust gases and the approximate equations for trend lines.



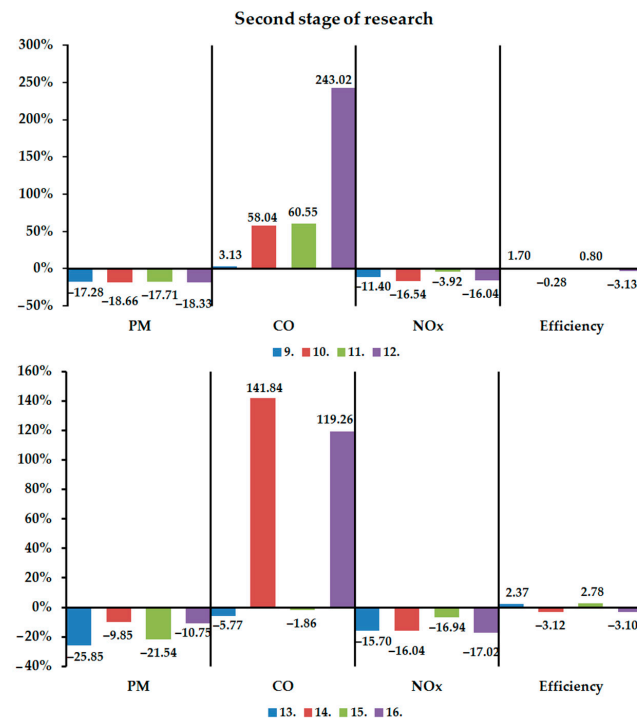
**Figure 12.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the thirteenth and fourteenth cycle of tests.

In the case of the fifteenth and sixteenth cycle of tests, it was observed that the introduction of water steam to the afterburning chamber at the flow rate of 3.60 kg/h resulted in an increase in the emitted CO by approximately 119% for the boiler operating at nominal power, however, for the boiler operating at minimum power, the CO emission decreased by approximately 6%. Dust emission was lower in comparison to the normal operation of the boiler by approximately 18%, regardless of the boiler power. The NO<sub>x</sub> emission decreased by approximately 17%. Hydrogen was detected in exhaust gases in the average amount of approximately 7.06 mg/m<sup>3</sup> to 9.75 mg/m<sup>3</sup>. The efficiency of the combustion process in the case of the boiler operating at nominal power decreased by approximately 3%, and in the case of the boiler operating at minimum power it increased by approximately 2%. The average exhaust gas temperature was from approximately 139 °C to approximately 175 °C. The temperature inside the combustion chamber increased by approximately 16 °C (the temperature was approximately 836 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the combustion chamber dropped by approximately 52 °C (the temperature was approximately 962 °C). The temperature in the afterburning chamber increased by approximately 8 °C (the temperature was approximately 705 °C) for the minimal power, while for the boiler operating at nominal power the temperature inside the afterburning chamber dropped by approximately 50 °C (the temperature was approximately 807 °C). Figure 13 shows the mass distribution obtained for the emission of harmful substances with reference to the oxygen content in the exhaust gases and the approximate equations for trend lines.



**Figure 13.** Mass distribution of harmful substances to the remaining amount of oxygen for the fifteenth and sixteenth cycle of tests.

The following Table 5 shows the results obtained for individual test cycles for the second stage of research. Figure 14 shows graphical changes in the emission of harmful substances as well as the efficiency of the combustion process after supplying water steam to the combustion and afterburning chambers at different flow rates. The values were obtained on the basis of a comparison of the average emission parameters of individual harmful exhaust gas components with the values obtained for the standard boiler operation at minimal and nominal power (cycles seven and eight).



**Figure 14.** Changes in emission and efficiency parameters of the combustion process obtained for the second stage of research (cycles from 9 to 16).

Table 5. Results of the second stage of research.

Measurement Cycle	Measurement Value	CO mg/m <sup>3</sup>	NOx mg/m <sup>3</sup>	PM mg/m <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	η %
7.	Average	516.11	479.23	112.65	0.46	89.96
	Median	209.66	477.21	103.00	0.43	94.80
	Dominant	134.76	551.92	95.00	0.35	94.55
	Minimum	107.96	351.45	75.00	0.00	85.32
	Maximum	5840.42	650.54	312.00	1.99	92.80
8.	Average	58.20	285.23	92.55	8.09	94.77
	Median	50.15	286.71	96.00	2.00	94.80
	Dominant	65.34	286.38	103.00	0.98	94.55
	Minimum	30.68	246.07	33.00	0.00	93.43
	Maximum	158.65	228.49	123.00	5.95	95.53
9.	Average	532.27	424.60	93.18	4.83	91.49
	Median	529.92	430.74	93.00	4.53	91.48
	Dominant	500.66	364.48	89.00	1.52	91.67
	Minimum	421.69	323.89	65.00	0.94	90.01
	Maximum	661.20	549.77	126.00	12.30	93.23
10.	Average	91.98	238.05	75.28	3.46	94.50
	Median	84.58	235.31	75.00	2.91	94.45
	Dominant	80.51	235.47	75.00	2.66	94.43
	Minimum	68.34	225.16	52.00	1.77	93.88
	Maximum	186.47	261.72	98.00	10.35	95.98
11.	Average	828.62	460.46	92.70	9.17	90.68
	Median	719.50	469.01	97.00	5.80	90.67
	Dominant	685.95	375.22	101.00	4.43	92.30
	Minimum	466.33	300.88	40.00	3.69	88.49
	Maximum	1809.03	600.78	162.00	41.38	92.84
12.	Average	199.64	239.47	75.59	8.02	91.80
	Median	82.60	235.47	76.00	6.86	91.83
	Dominant	23.79	235.47	77.00	5.47	91.95
	Minimum	10.84	220.00	40.00	3.44	91.13
	Maximum	656.87	261.72	106.00	15.93	92.55
13.	Average	486.33	460.46	83.53	5.34	92.09
	Median	478.08	417.21	84.00	5.02	92.03
	Dominant	479.60	411.06	85.00	1.31	92.39
	Minimum	417.91	282.84	59.00	1.04	90.70
	Maximum	609.54	496.93	104.00	14.20	93.41
14.	Average	140.75	239.47	83.43	8.02	91.81
	Median	140.44	235.47	84.04	7.81	91.80
	Dominant	127.00	235.47	89.81	6.31	91.60
	Minimum	118.02	220.00	59.19	3.44	91.14
	Maximum	163.06	261.72	107.01	15.93	92.50
15.	Average	506.50	445.97	88.39	9.75	92.46
	Median	467.74	453.14	89.00	2.67	91.85
	Dominant	456.25	480.10	87.00	1.49	92.39
	Minimum	414.34	356.09	67.00	0.78	90.66
	Maximum	790.83	531.05	105.00	38.17	95.54
16.	Average	127.61	236.69	82.60	7.06	91.83
	Median	126.92	251.38	79.00	5.57	91.86
	Dominant	118.04	261.40	71.00	4.94	92.04
	Minimum	103.93	159.16	54.00	3.89	90.68
	Maximum	173.79	289.77	122.00	17.14	92.69

By analyzing the results obtained for all test cycles (in relation to the tests without water steam supplied to the boiler), it can be observed that in the case of a boiler without an afterburning chamber (Q EKO 15), the exhaust gas temperature and the combustion

chamber temperature with the water steam addition (regardless of steam water stream) decreases. At the same time, it can be seen that the higher the temperature drop in the combustion chamber, the higher the emissions of CO: for a 46 °C reduction in temperature in the combustion chamber, CO increased by 155%, and for a 86 °C reduction in temperature in the combustion chamber, CO increased by 267%, compared to standard work.

It should be emphasized that the feed of steam, in terms of energy, is ballast (heat absorption), which may transform into an efficiency reduction in the system. Nevertheless, the tested solution can ultimately be used in condensing boilers, which will make the energy contained in the water steam in the exhaust gas recoverable, and this will make the change in the energy system's efficiency unnoticeable.

Lowering the temperature (as mentioned above) consequently makes the process of oxidation of the carbon element to carbon dioxide impossible to complete; the process is interrupted, which contributes to the increase in CO emissions. This issue was not analyzed in detail, due to the fact that the main issue was the reduction of PM emissions, while the reduction of carbon monoxide emissions will be possible with the use of afterburning chambers or systems.

At the same time, constant parameters in relation to NO<sub>x</sub> emission can be observed, which can be confirmed by the slight influence of the thermal mechanism on the emission of nitrogen oxides from low-power heating boilers. The steam water supply in both cycles (cycles four and six) was respectively 0.71 kg/h and 3.60 kg/h, while the reduction in PM emissions based on the results obtained is the same, and is associated with a change in the stoichiometry of the combustion process and its reorganization from the incomplete combustion process, with significant soot release to the combustion process with significant CO emission. The addition of steam in the amount of 0.71 kg/h resulted in a complete reduction of soot, therefore, the further increase in the amount of steam water did not bring any measurable effect, and thus the PM emission did not decrease.

Analyzing the results obtained for the boiler with an additional afterburning chamber (KN-20), it can be seen that the temperature of the exhaust gases and the temperature inside the combustion and afterburning chamber increase with the increasing amount of steam supplied for combustion (regardless of the place of steam injection). The temperature increase is higher in the case of boiler operation at nominal power compared to operation at minimum power, which is associated with a greater stream of fuel feeding. Similar to boilers not equipped with an additional afterburning chamber, a mechanism can be observed where the additional thermodynamic medium (water steam) absorbs a part of the heat, which in turn deteriorates the process of carbon oxidation to carbon dioxide and detects increased CO emissions. In both configurations (steam injection into the combustion chamber or the afterburning chamber), intensification of heat in the system and the problem with its removal by the boiler are visible (exhaust gas temperature increase). However, in the case of both configurations, a reduction in the NO<sub>x</sub> emission can be observed (from approximately 3% to approximately 17%) as well as for PM (from approximately 9% to approximately 25%).

These results may indicate the occurrence of reducing reactions on these substances in the combustion chamber, where the temperature during the tests with the water steam supply fluctuated in the range of 826 °C to 962 °C. High temperatures could deepen the reduction in PM by exceeding the ash softening temperature and keeping it within the boiler (PM reduction above 20%). In the case of NO<sub>x</sub> emissions, an increase in the exhaust gas temperature inside the combustion chamber (by supplying water steam) resulted in a decreasing emission. This process is associated with an increased share of radiation on the exhaust gas side, which deepened the redox reactions on nitrogen oxides.

The most favorable emission results (reduction) were obtained for cycles three and thirteen, with an average decrease in CO by approximately 5% to approximately 16%, an average decrease in NO<sub>x</sub> by approximately 15% to approximately 27% and an average decrease in PM by approximately 12% to approximately 25%. In both of these research cycles, water steam was added to the combustion process with an expenditure of 0.71 kg/h.

In the case of cycle three, a decrease in exhaust gas temperature and temperature inside the combustion chamber was observed. In the case of cycle thirteen, an increase in exhaust gas temperature and temperature inside the combustion and afterburning chamber was observed. The increased temperature could transform into a stronger afterburning of soot (PM), while in the case of a boiler equipped with an afterburning chamber, a greater amount of NO<sub>x</sub> in relation to the boiler without an afterburning chamber was observed.

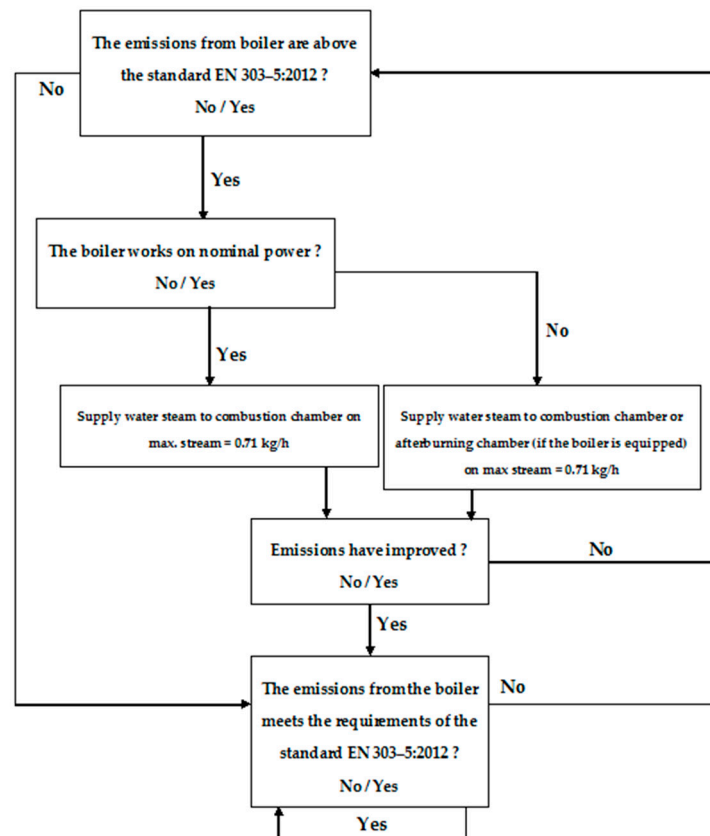
The injection of water steam to the combustion process may contribute to the occurrence of pyrolysis in certain areas and, consequently, the formation of hydrocarbon compounds which were not analyzed by the authors as a component of the resulting exhaust gases. This results from the fact that at the prevailing temperature in the system (above 750 °C), combined with the appropriate residence time of the particles (min. 2 s) the hydrocarbons' oxidation to water steam and carbon dioxide is guaranteed. In addition, in commercial applications, the introduction of a possible afterburning system (as mentioned earlier) will multiply the above phenomena of hydrocarbon oxidation.

The results obtained on the basis of the research showed that the most favorable reduction in harmful substances was obtained for the boiler operation at minimal power with a water steam supply output of 0.71 kg/h. These results provide a proper premise for an application approach to the implementation of this technology in mass-produced heating boilers. On the basis of previously carried out studies [13–15], solid fuel heating boilers in Poland operate with an average annual power under 30% of the rated power, which results in poor air quality in Poland during the heating period, and at the same time provides a basis for implementation of the tested technology. For such operating parameters (the most common ones), an algorithm was made to supply water vapor to reduce the emission of harmful substances. The algorithm was based on the research and information on the highest reduction in harmful substances (Figures 8 and 14).

The proposed algorithm meets the conditions for reducing harmful substances in the boilers unequipped with an additional afterburning chamber. The combustion chamber is understood as a chamber where the fuel is burnt. The afterburning chamber is understood to mean an exhaust gas chamber where hot exhaust gases and a flame freely penetrate. The proposed algorithm of the procedure may help to create a preliminary algorithm or machine learning algorithm for the purpose of creating an automatic control system and water steam dosing for the combustion process. Such an algorithm could be based on information about the exhaust gas temperature and the temperature inside the combustion/afterburning chamber. A similar control system based on the analysis of exhaust gas temperature and oxygen content in the exhaust gas to reduce harmful substances and minimize the amount of fuel burned has been researched in the articles [13–15].

An action algorithm was developed on the basis of the analysis for introducing wet steam to the hard coal combustion process in low power heating boilers fitted with an afterburning chamber. It was observed that the greater the stream of water steam introduced to the combustion process, the greater the CO emission (31–90%) in comparison to the normal operation of the boiler. In the case of PM, there was a sharp decrease in emission (12–25%). In turn, the NO<sub>x</sub> emission slightly decreased (2–5%) in comparison to the normal operation of the boiler. The effect can be the result of the occurrence of chemical reactions mentioned in the introduction. The evidence supporting the hypothesis is the rapid increase in the emission of CO and H<sub>2</sub>. In the case of steam water fed to the afterburning chamber, no significant increases in the CO emission were observed, and there was a positive decrease in the PM (approximately 20%) and NO<sub>x</sub> (approximately 7%) emissions in comparison to the normal operation of the boiler.

The action algorithm developed for introducing steam water to the coal-derived fuel combustion process occurring inside a low power boiler is depicted in the following Figure 15.



**Figure 15.** The scheme of the action algorithm developed for the solid fuel heating boiler system with steam water fed in order to limit the amount of harmful substances emitted.

#### 4. Conclusions

The paper at hand revolved around research on the coal-derived fuel combustion process in the steam water environment. Two boilers were used for the research: the first one was a traditional heating boiler fueled with coal, and the second one was fitted with a steam afterburning chamber. Depending on the boiler configuration, steam water was fed both to the combustion chamber as well as to the afterburning chamber. The research conducted confirmed that the supply of steam water to the combustion chamber as well as to the afterburning chamber results in a decreased PM emission and an increased CO emission, depending on the mass of the steam stream and the boiler power. As for the emission of nitric oxides, the most frequently observed result was a decrease by several or even a dozen percent. Considering that the main source of nitric oxide creation in low power boilers is the fuel mechanism, it is safe to say that the addition of steam water to the burnt fuel has an effect on the changes in chemism of the combustion process. The introduction of steam water to the afterburning chamber has a positive effect on the emission properties of the boiler in terms of the emitted solid particles. The research conducted shows that the dust and nitric oxide neutralization level is close to the level obtained when steam is fed to the combustion chamber, however, it is important to remark that the increased coal oxide emission is much greater than in the case of feeding steam water to the afterburning chamber. The main aim of the conducted research was to confirm the previous research on lowering the emission of harmful substances with the use of steam water in heating boilers fueled with solid fuels. The theoretical principle of the research was the following chemical reaction (1), which results in the oxidation process of carbon contained, for instance, in soot. The amount of carbon dioxide created during the chemical reaction was slightly lowered in the afterburning chamber, while the amount of the emitted dust was significantly reduced.



The effects of changes in the chemism of the combustion process are satisfactory, thus, it is a sufficient incentive for the popularization of this technology among manufacturers of solid fuel heating boilers. The technology used, of feeding steam water to the afterburning chamber of the heating boiler, allows for the emitted dust to be reduced so that a positive effect on the improvement of ecological parameters of the boiler can be achieved.

One of the grounds for further research is the assessment of steam water efficiency supplied using ultrasound methods. Such systems use much less electricity to create the thermodynamic factor in the form of a water particle suspension in the air, and they eliminate the necessity of designing a pressure tank. While reviewing the rationality of modifications performed on boilers which are non-compliant with the current Polish and EU regulations on the purity of exhaust gases, it is worth considering their modification in the form of an additional afterburning chamber fitted in order to improve their emission parameters and to make them compliant with the applicable standards.

**Author Contributions:** Conceptualization. B.C. and K.G.; methodology. B.C.; software. B.C.; validation. B.C., R.J. and K.G.; formal analysis. B.C., R.J. and K.G.; investigation. B.C., R.J. and Z.N.; resources. B.C., R.J. and K.G.; data curation. B.C., R.J. and K.G.; writing—original draft preparation. B.C., R.J. and K.G.; writing—review and editing. B.C., R.J. and K.G.; visualization. B.C., R.J. and K.G.; supervision. B.C., R.J. and K.G.; project administration. Z.N.; funding acquisition. Z.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** The research was financed by the Poznan University of Technology's financial resources for statutory activity. The number of projects: 0712/SBAD/5180 and 0712/SBAD/5202.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Nomenclature

GIOŚ	Chief Inspectorate of Environmental Protection
$\eta$	combustion process efficiency
CO	carbon monoxide
CO <sub>2</sub>	carbon dioxide
NO	nitrogen oxide
NO <sub>x</sub>	nitrogen oxides
OGC	gasoline organic compounds
PM	particulate matter
T <sub>1</sub>	water inlet measurement temperature point
T <sub>2</sub>	water outlet measurement temperature point
(s)	solid substance
(g)	gaseous substance

## References

1. Caposciutti, G.; Barontini, F.; Antonelli, M.; Tognotti, L.; Desideri, U. Experimental investigation on the air excess and air displacement influence on early stage and complete combustion gaseous emissions of a small scale fixed bed biomass boiler. *Appl. Energy* **2018**, *216*, 576–587. [[CrossRef](#)]
2. Ciupek, B.; Judt, W.; Urbaniak, R.; Kłosowiak, R. The emission of carbon monoxide and nitrogen oxides from boilers supplied by a pellet under the influence of changes in the air-fuel equivalence ratio. *J. Ecol. Eng.* **2019**, *20*, 34–38. [[CrossRef](#)]
3. Ciupek, B.; Gołoś, K. Concentration of Nitrogen Oxides When Burning Wood Pellets of Various Origins. *J. Ecol. Eng.* **2020**, *21*, 229–233. [[CrossRef](#)]
4. Zhu, Y.; Yang, W.; Fan, J.; Kan, T.; Zhang, W.; Liu, H.; Cheng, W.; Yang, H.; Wu, X.; Chen, H. Effect of sodium carboxymethyl cellulose addition on particulate matter emissions during biomass pellet combustion. *Appl. Energy* **2018**, *230*, 925–934. [[CrossRef](#)]
5. Tucki, K.; Orynycz, O.; Wasiak, A.; Świć, A.; Mieszkalski, L.; Wichłacz, J. Low Emissions Resulting from Combustion of Forest Biomass in a Small Scale Heating Device. *Energies* **2020**, *13*, 5495. [[CrossRef](#)]




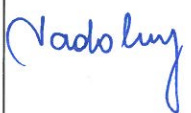
6. Jaworek, A.; Sobczyk, A.T.; Marchewicz, A.; Krupa, A.; Czech, T. Particulate matter emission control from small residential boilers after biomass combustion. *A review. Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *137*, 110446. [[CrossRef](#)]
7. Singh, R.; Shukla, A. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *29*, 854–864. [[CrossRef](#)]
8. Ciupek, B.; Janeba-Bartoszewicz, E.; Urbaniak, R. Effect of fineness and increased humidity of carbonaceous fuels on the chemical composition of exhaust gases. *Chem. Ind.* **2019**, *1*, 8. [[CrossRef](#)]
9. Ozgen, S.; Cernuschi, S.; Caserini, S. An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *135*, 110113. [[CrossRef](#)]
10. Ciupek, B.; Urbaniak, R. Optimization of the Retort Burner Construction to Reduce Emission of Harmful Substances. *Heat. Vent.* **2018**, *49*, 519–524. [[CrossRef](#)]
11. Ciupek, B.; Urbaniak, R.; Bartoszewicz, J. Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides from a Low Power Boiler Depending on the Coal Fuel Used. *Heat. Vent.* **2018**, *1*, 12–16. [[CrossRef](#)]
12. Horák, J.; Laciok, V.; Krpec, K.; Hopan, F.; Dej, M.; Kubesa, P.; Ryšavý, J.; Molchanov, O.; Kuboňová, L. Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter. *Atm. Env.* **2020**, *229*, 15–117437. [[CrossRef](#)]
13. Gołoś, K.; Ciupek, B.; Judt, W.; Urbaniak, R. Impact of replacement of solid fuel heating boilers on air quality in Poland in 2000–2020. *Chem. Ind.* **2021**, *1*, 96–99. [[CrossRef](#)]
14. Ministry of Climate and Environment. National Balance of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, Dust, Heavy Metals and POPs Emissions. In *Synthetic Report for 1990–2019*; Ministry of Climate and Environment: Warsaw, Poland, 2021. (In Polish)
15. Ciupek, B.; Judt, W.; Gołoś, K.; Urbaniak, R. Analysis of Low-Power Boilers Work on Real Heat Loads: A Case of Poland. *Energies* **2021**, *14*, 3101. [[CrossRef](#)]
16. Ciupek, B. Possibilities of Reducing Harmful Substance from the Heating Boiler by Co-Firing Black Coal with Non-Woody Biomass. *Dist. Heat. Heat. Vent.* **2018**, *1*, 7–11. [[CrossRef](#)]
17. Ciupek, B. Effect of supply water steam to combustion process of black coal on the chemical composition of exhaust gases. *Chem. Ind.* **2019**, *1*, 98–102. [[CrossRef](#)]
18. Kurc, B.; Lijewski, P.; Rymaniak, Ł.; Fuć, P.; Pięłowska, M.; Urbaniak, R.; Ciupek, B. High-Energy Solid Fuel Obtained from Carbonized Rice Starch. *Energies* **2020**, *13*, 4096. [[CrossRef](#)]
19. Ciupek, B. Study on hard coal combustion in heating boilers equipped with a steam-fed afterburning chamber. *Chem. Ind.* **2020**, *99*, 8. [[CrossRef](#)]
20. Judt, W.; Ciupek, B.; Urbaniak, R. Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber. *Energy* **2020**, *196*, 117093. [[CrossRef](#)]
21. Pokharel, S.; Ayoobi, M.; Akkerman, V. Computational Analysis of Premixed Syngas/Air Combustion in Micro-channels: Impacts of Flow Rate and Fuel Composition. *Energies* **2021**, *14*, 4190. [[CrossRef](#)]
22. Mitchell, E.J.S.; Lea-Langton, A.R.; Jones, J.M.; Williams, A.; Layden, P.; Johnson, R. The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Process. Techn.* **2016**, *142*, 115–123. [[CrossRef](#)]
23. Williams, A.; Jones, J.M.; Ma, L.; Pourkashanian, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Prog. Energy Comb. Sci.* **2012**, *38*, 2–113. [[CrossRef](#)]
24. Ślęfarski, R.; Jójka, J.; Czyżewski, P.; Grzymisławski, P. Experimental investigation on syngas reburning process in a gaseous fuel firing semi-industrial combustion chamber. *Fuel* **2018**, *217*, 490–498. [[CrossRef](#)]
25. Ślęfarski, R.; Czyżewski, P.; Gołębiewski, M. Experimental study on combustion of CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> fuel blends in an industrial furnace operated in flameless conditions. *Therm. Sci.* **2020**, *24*, 3625–3635. [[CrossRef](#)]
26. Ślęfarski, R. Study on the Combustion Process of Premixed Methane Flames with CO<sub>2</sub> Dilution at Elevated Pressures. *Energies* **2019**, *12*, 348. [[CrossRef](#)]
27. Kangyeop, L.; Hyungmo, K.; Poomin, P.; Sooseok, Y.; Youngsung, K. CO<sub>2</sub> radiation heat loss effect on NO<sub>x</sub> emissions and combustion instabilities in lean premixed flames. *Fuel* **2013**, *106*, 682–689. [[CrossRef](#)]
28. Li, J.; Jankowski, R.; Kotecki, R.; Yang, W.; Szewczyk, D.; Brzdekiewicz, A.; Blasiak, W. CFD Approach for Unburned Carbon Reduction in Pulverized Coal Boilers. *Energy Fuels* **2012**, *26*, 926–937. [[CrossRef](#)]
29. Li, J.; Jankowski, R.; Kotecki, R.; Yang, W.; Szewczyk, D.; Blasiak, W.; Brzdekiewicz, A. Numerical Analysis of Loads Effect on Combustion Performance and NO<sub>x</sub> Emissions of a 220 MW Pulverized Coal Boiler. *Clean. Combust. Sustain. World* **2013**, 1019–1029. [[CrossRef](#)]
30. De Persis, S.; Cabot, G.; Pillier, L.; Gökalp, I.; Boukhalfa, A.M. Study of Lean Premixed Methane Combustion with CO<sub>2</sub> Dilution under Gas Turbine Conditions. *Energy Fuels* **2013**, *27*, 1093–1103. [[CrossRef](#)]
31. Anufriev, I. Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NO<sub>x</sub> reduction: Waste-to-energy trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *138*, 110665. [[CrossRef](#)]
32. Szufa, S. Use of superheated steam in the process of biomass torrefaction. *Chem. Ind.* **2020**, *99*, 1797–1801. [[CrossRef](#)]
33. EN 303-5:2012 Heating Boilers—Part 5: Heating Boilers for Solid Fuels, Manually and Auto-Matically Stocked, Nominal Heat Output of up to 500 kW—Terminology, Requirements, Testing and Marking; Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2012.

34. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products; 2009. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125> (accessed on 8 October 2021).
35. Commission Regulation (EU) 2015/1189—of 28 April 2015—Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Solid Fuel Boilers; 2015. Available online: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L\\_.2015.193.01.0100.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2015.193.01.0100.01.ENG) (accessed on 8 October 2021).
36. *WUDT-UC-WO-O/00:01.2005 Conditions of the Office of Technical Inspection Regarding Pressure Equipment. Strength Calculations. General Requirements*; Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2005.

Poznań, 14.10.2021

**Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie publikacji naukowej**

**Bartosz Ciupek**, Karol Gołoś, Radosław Jankowski, Zbigniew Nadolny, Effect of Hard Coal Combustion in Water Steam Environment on Chemical Composition of Exhaust Gases, Energies - 2021, vol. 14, no. 20 s. 6530-1–24 DOI: 10.3390/en14206530

Lp.	Imię i nazwisko	Włożony nakład pracy	Udział %	Podpis
1.	<b>Bartosz Ciupek</b>	Opracowanie koncepcji i metodyki realizacji badań. Zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych i analiza uzyskanych wyników. Opracowanie wniosków końcowych, wsparcie merytoryczne.	70%	
2.	Karol Gołoś	Przeprowadzenie badań, redakcja tekstu, wsparcie merytoryczne.	15%	
3.	Radosław Jankowski	Redakcja tekstu, opracowanie wniosków, wsparcie merytoryczne.	10%	
4.	Zbigniew Nadolny	Redakcja tekstu, wsparcie merytoryczne	5%	

# Załącznik 3

1. Spis głównej literatury wykorzystanej podczas przygotowania rozprawy doktorskiej.

## Bibliografia

- [1] Caposciutti, G.; Barontini, F.; Antonelli, M.; Tognotti, L.; Desideri, U. Experimental investigation on the air excess and air displacement influence on early stage and complete combustion gaseous emissions of a small scale fixed bed biomass boiler. *Appl. Energy* 2018, 216, 576-587, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.125
- [2] Zhu, Y.; Yang, W.; Fan, J.; Kan, T.; Zhang, W.; Liu, H.; Cheng, W.; Yang, H.; Wu, X.; Chen, H. Effect of sodium carboxymethyl cellulose addition on particulate matter emissions during biomass pellet combustion. *Appl. Energy* 2018, 230, 925-934, doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.013
- [3] Tucki, K.; Orynycz, O.; Wasiak, A.; Świć, A.; Mieszkalski, L.; Wichłacz, J. Low Emissions Resulting from Combustion of Forest Biomass in a Small Scale Heating Device. *Energies* 2020, 13, 5495, doi: 10.3390/en13205495.
- [4] Jaworek, A.; Sobczyk, A.T.; Marchewicz, A.; Krupa, A.; Czech, T. Particulate matter emission control from small residential boilers after biomass combustion. A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 137, 110446, doi:10.1016/j.rser.2020.110446.
- [5] Singh, R.; Shukla, A. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 29, 854–864, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.005.
- [6] Ozgen, S.; Cernuschi, S.; Caserini, S. An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 135, 110113, doi: 10.1016/j.rser.2020.110113.
- [7] Horák, J.; Laciok, V.; Krpec, K.; Hopan, F.; Dej, M.; Kubesa, P.; Ryšavý, J.; Molchanov, O.; Kuboňová, L. Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter *Atm. Env.* 2020, 229, 15, 117437, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117437.
- [8] Ministry of Climate and Environment. National Balance of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, dust, heavy metals and POPs emissions. Synthetic Report for 1990-2019. Warszawa (in Polish), 2021;
- [9] Pokharel, S.; Ayoobi, M.; Akkerman, V. Computational Analysis of Premixed Syngas/Air Combustion in Micro-channels: Impacts of Flow Rate and Fuel Composition. *Energies* 2021, 14, 4190, doi: 10.3390/en14144190.
- [10] Mitchell, E.J.S.; Lea-Langton, A.R.; Jones, J.M.; Williams, A.; Layden, P.; Johnson, R. The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Process. Techn.* 2016, 142, 115-123, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.09.031.
- [11] Williams, A.; Jones, J.M.; Ma, L.; Pourkashanian, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Prog. in Energy and Comb. Sci.* 2012, 38, 2, 113-137, doi: 10.1016/J.PECS.2011.10.001.
- [12] Ślęfarski, R.; Jójka, J.; Czyżewski, P.; Grzymisławski P. Experimental investigation on syngas reburning process in a gaseous fuel firing semi-industrial

- combustion chamber. Fuel 2018, 217, 490-498, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.091>
- [13] Ślęfarski, R.; Czyżewski, P.; Gołębiewski, M. Experimental study on combustion of CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> fuel blends in an industrial furnace operated in flameless conditions. Therm. Sci. 2020, 24, 3625-3635, <https://doi.org/10.2298/TSCI200401282S>
- [14] Ślęfarski, R. Study on the Combustion Process of Premixed Methane Flames with CO<sub>2</sub> Dilution at Elevated Pressures. Energies. 2019, 12, 348, doi:10.3390/en12030348
- [15] Kangyeop. L.; Hyungmo. K.; Poomin. P.; Sooseok. Y., Youngsung. K. CO<sub>2</sub> radiation heat loss effect on NO<sub>x</sub> emissions and combustion instabilities in lean premixed flames. Fuel 2013, 106, 682-689, doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.048
- [16] Li. J.; Jankowski. R.; Kotecki. R.; Yang. W.; Szewczyk. D.; Brzdekiewicz. A.; Blasiak. W. CFD Approach for Unburned Carbon Reduction in Pulverized Coal Boilers. Energy Fuels 2012, 26, 926-937, [dx.doi.org/10.1021/ef201700a](https://doi.org/10.1021/ef201700a)
- [17] Li. J.; Jankowski. R.; Kotecki. R.; Yang. W.; Szewczyk. D.; Blasiak. W.; Brzdekiewicz. A. Numerical Analysis of Loads Effect on Combustion Performance and NO<sub>x</sub> Emissions of a 220 MW Pulverized Coal Boiler. Clean. Combust. and Sustain. World 2013, 1019-1029, doi:10.1007/978-3-642-30445-3\_136
- [18] De Persis. S.; Cabot. G.; Pillier. L.; Gökalp. I.; Boukhalfa. A.M. Study of Lean Premixed Methane Combustion with CO<sub>2</sub> Dilution under Gas Turbine Conditions. Energy Fuels 2013, 27, 2, 1093-1103, doi: 10.1021/ef3016365
- [19] Anufriev, I. Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NO<sub>x</sub> reduction: Waste-to-energy trends. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 138, 110665, doi: 10.1016/j.rser.2020.110665.
- [20] Szufa, S. Use of superheated steam in the process of biomass torrefaction. Chem. Ind. 2020, 99, 12, 1797-1801, doi: 10.15199/62.2020.12.22.
- [21] Polish Committee for Standardization PN-EN 303-5:2012 Heating boilers - Part 5: heating boilers for solid fuels, manually and auto-matically stocked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking; 2012;
- [22] WUDT-UC-WO-O/00:01.2005 Conditions of the Office of Technical Inspection regarding pressure equipment. Strength calculations. General requirements. January 2005;
- [23] Commission Regulation (EU) 2015/1189 - of 28 April 2015 - implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers; 2015;
- [24] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. 2009, L285/10–L285/35. Available online: (accessed on).
- [25] Khomenko, S.; Cirach, M.; Pereira-Barboza, E.; Mueller, N.; Barrera-Gómez, J.; Rojas-Rueda, D.; de Hoogh, K.; Hoek, G.; Nieuwenhuijsen, M. Premature

- mortality due to air pollution in European cities: A health impact assessment. *Lancet Planet. Health* 2021, doi:10.1016/s2542-5196(20)30272-2.
- [26] Graboś, A.; Żymankowska-Kumon, S.; Sadlok, J.; Sadlok, R. Counteracting Low Emissions in Dense Residential Areas; Sadlok, R., Ed.; Association for Energy Efficiency and the Development of Renewable Energy Sources “HELIOS”: Bochnia, Poland, 2014.
- [27] World Health Organization Health effects of Particulate Matter, Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia; World Health Organization: Copenhagen, Denmark, 2013.
- [28] Wang, J.; Zhou, Z.; Zhao, J.; Zheng, J.; Guan, Z. Towards a cleaner domestic heating sector in China: Current situations, implementation strategies, and supporting measures. *Appl. Therm. Eng.* 2019, 152, 515–531, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.117.
- [29] Concha-Barrrientos, M.; Nelson, D.; Driscoll, T.; Steenland, N.; Punnett, L.; Fingerhut, M.; Prüss-Üstün, A.; Leigh, J.; Tak, S.; Corvalan, S. Selected Occupational Risk Factors. In *Comparative Quantification of Health Risks*; Ezzati, M., Lopez, A., Rodgers, A., Murray, C., Eds.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2004; pp. 1651–1801.
- [30] Statistics Poland Energy consumption in Polish households in 2018 Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/environment-energy/energy/energy-consumption-in-households-in-2018,2,5.html> (accessed on 15 March 2021).
- [31] Wu, S.; Zheng, X.; Khanna, N.; Feng, W. Fighting coal—Effectiveness of coal-replacement programs for residential heating in China: Empirical findings from a household survey. *Energy Sustain. Dev.* 2020, 55, 170–180, doi:10.1016/j.esd.2020.02.002.
- [32] Kazakevicius, E.; Schipper, L.; Meyers, S. The residential space heating problem in Lithuania. *Energy Policy* 1998, 26, 831–858, doi:10.1016/S0301-4215(98)00005-6.
- [33] Gaigalis, V.; Skema, R. Analysis of fuel and energy transition in Lithuanian households sector and its sustainable development in compliance with the EU policy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 37, 273–287, doi:10.1016/j.rser.2014.05.031.
- [34] Barma, M.C.; Saidur, R.; Rahman, S.M.A.; Allouhi, A.; Akash, B.A.; Sait, S.M. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 79, 970–983, doi:10.1016/j.rser.2017.05.187.
- [35] Ye, Y.; Qiu, D.; Wang, H.; Tang, Y.; Strbac, G. Real-Time Autonomous Residential Demand Response Management Based on Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Learning. *Energies* 2021, 14, 531, doi:10.3390/en14030531.
- [36] Lee, C.; Jung, D.E.; Lee, D.; Kim, K.H.; Do, S.L. Prediction Performance Analysis of Artificial Neural Network Model by Input Variable Combination for Residential Heating Loads. *Energies* 2021, 14, 756, doi:10.3390/en14030756.



- [37] Leadership of Chief Inspectorate Of Environmental Protection Air quality—Measurement data Available online: <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current> (accessed on 15 March 2021).
- [38] Cuellar, A.; Herzog, H. A Path Forward for Low Carbon Power from Biomass. *Energies* 2015, 8, 1701–1715, doi:10.3390/en8031701.
- [39] Estiaty, L.M.; Fatimah, D. Widodo Bio-coal briquettes using low-grade coal. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018, 118, 012066, doi:10.1088/1755-1315/118/1/012066.
- [40] Fuller, A.; Maier, J.; Karampinis, E.; Kalivodova, J.; Grammelis, P.; Kakaras, E.; Scheffknecht, G. Fly Ash Formation and Characteristics from (co-) Combustion of an Herbaceous Biomass and a Greek Lignite (Low-Rank Coal) in a Pulverized Fuel Pilot-Scale Test Facility. *Energies* 2018, 11, 1581, doi:10.3390/en11061581.
- [41] Issac, M.; De Girolamo, A.; Dai, B.; Hosseini, T.; Zhang, L. Influence of biomass blends on the particle temperature and burnout characteristics during oxy-fuel co-combustion of coal. *J. Energy Inst.* 2020, 93, 1–14, doi:10.1016/j.joei.2019.04.014.
- [42] Bhatia, S.K.; Joo, H.-S.; Yang, Y.-H. Biowaste-to-bioenergy using biological methods—A mini-review. *Energy Convers. Manag.* 2018, 177, 640–660, doi:10.1016/j.enconman.2018.09.090.
- [43] Giannetti, B.F.; Barrella, F.A.; Almeida, C.M.V.B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: Ternary diagrams and energy accounting. *J. Clean. Prod.* 2006, 14, 201–210, doi:10.1016/j.jclepro.2004.09.002.
- [44] Mehmood, S.; Reddy, B.V.; Rosen, M.A. Energy Analysis of a Biomass Co-firing Based Pulverized Coal Power Generation System. *Sustainability* 2012, 4, 462–490, doi:10.3390/su4040462.
- [45] Steurer, E.; Ardisson, G. Hydrothermal Carbonization and Gasification Technology for Electricity Production Using Biomass. *Energy Procedia* 2015, 79, 47–54, doi:10.1016/j.egypro.2015.11.473.
- [46] Steinbrück, J.; Tavakkol, S.; Francis, G.; Bockhorn, H. *Jatropha*—Potential of biomass steam processing to convert crop residues to bio-coal and thus triple the marketable energy output per unit plantation area. *Ind. Crops Prod.* 2019, 136, 59–65, doi:10.1016/j.indcrop.2019.04.065.
- [47] Handayani, H.E.; Ningsih, Y.B.; Meriansyah, M.S. Effects of carbonization duration on the characteristics of bio-coal briquettes (coal and cane waste). *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 478, 012027, doi:10.1088/1757-899X/478/1/012027.
- [48] Elyounssi, K.; Blin, J.; Halim, M. High-yield charcoal production by two-step pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2010, 87, 138–143, doi:10.1016/j.jaap.2009.11.002.
- [49] Yang, R.T. Active carbon. By H. Jankowska, A. Swiatkowski, and J. Choma, Ellis Horwood, West Sussex, England, and Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991, 280 pp. *AIChE J.* 1992, 38, 1998–1998, doi:10.1002/aic.690381220.

- [50] Leboda, R.; Skubiszewska-Zięba, J.; Bogillo, V.I. Influence of Gasification Catalyzed by Calcium and Steam Activation on the Porous Structure of Activated Carbons. *Langmuir* 1997, 13, 1211–1217, doi:10.1021/la951564x.
- [51] Lin, P.-C.; Wu, J.-Y.; Liu, W.-R. Green and facile synthesis of few-layer graphene via liquid exfoliation process for Lithium-ion batteries. *Sci. Rep.* 2018, 8, 9766, doi:10.1038/s41598-018-27922-z.
- [52] Aasim, M.; Foto, E.; Sameeullah, M. Nanoparticles for Sustainable Bioenergy and Biofuel Production. In *Biotechnology for Biofuels: A Sustainable Green Energy Solution*; Kumar, N., Ed.; Springer: Singapore, 2020; pp. 23–60, ISBN 9789811537608.
- [53] Skubiszewska-Zięba, J.; Leboda, R.; Charmas, B.; Grzegorzczak, W.; Szmigielski, R. On the preparation of synthetic carbon adsorbents using the sulfonated ion exchange resin duolite C-20. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2006, 86, 187–194, doi:10.1007/s10973-005-7150-5.
- [54] Danaei, M.; Dehghankhold, M.; Ataei, S.; Hasanzadeh Davarani, F.; Javanmard, R.; Dokhani, A.; Khorasani, S.; Mozafari, M.R. Impact of Particle Size and Polydispersity Index on the Clinical Applications of Lipidic Nanocarrier Systems. *Pharmaceutics* 2018, 10, 57; doi:10.3390/pharmaceutics10020057.
- [55] Liu, X.; Wang, Y.; Yu, L.; Tong, Z.; Chen, L.; Liu, H.; Li, X. Thermal degradation and stability of starch under different processing conditions. *Starch—Stärke* 2013, 65, 48–60, doi:10.1002/star.201200198.
- [56] Hadden, R.; Rein, G. Burning and Water Suppression of Smoldering Coal Fires in Small-Scale Laboratory Experiments. In *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*; Elsevier: 2011; pp. 317–326, ISBN 978-0-444-52858-2.
- [57] Eckhoff, R.K. *Explosion Hazards in the Process Industries*, 2nd ed.; Gulf Professional Publishing: Cambridge, MA, USA; Oxford, UK, 2016; ISBN 978-0-12-803274-9.
- [58] Magdziarz, A.; Wilk, M. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion. *Energy Convers. Manag.* 2013, 75, 425–430, doi:10.1016/j.enconman.2013.06.016.
- [59] Magdziarz, A.; Werle, S. Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS. *Waste Manag.* 2014, 34, 174–179, doi:10.1016/j.wasman.2013.10.033.
- [60] Chen, Y.; Mori, S.; Pan, W.-P. Studying the mechanisms of ignition of coal particles by TG-DTA. *Thermochim. Acta* 1996, 275, 149–158, doi:10.1016/0040-6031(95)02727-0.
- [61] Szymomska, J.; Wodnicka, K. Effect of multiple freezing and thawing on the surface and functional properties of granular potato starch. *Food Hydrocoll.* 2005, 19, 753–760, doi:10.1016/j.foodhyd.2004.08.004.
- [62] Urbaniak, R.; Bartoszewicz, J.; Judt, W. Analysis of the possibilities of application of numerical methods in the improvement of the operating efficiency of low-power boilers. *Heat Transf. Res.* 2018, 49, 675–683, doi:10.1615/HeatTransRes.2018019827.

- [63] Asadullah, M.; Adi, A.M.; Suhada, N.; Malek, N.H.; Saringat, M.I.; Azdarpour, A. Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal. *Energy Convers. Manag.* 2014, 88, 1086–1093, doi:10.1016/j.enconman.2014.04.071.
- [64] Troiano, M.; Solimene, R.; Montagnaro, F.; Salatino, P. Char/ash deposition and near-wall segregation in slagging entrained-flow gasification of solid fuels: From experiments to closure equations. *Fuel* 2020, 264, 116864, doi:10.1016/j.fuel.2019.116864.

# Załącznik 4

1. Spis publikacji naukowych niewchodzących w skład rozprawy doktorskiej.

1. Urbaniak R., **Ciupek B.**, Kłosowiak R., Nygard A., 2018, Analysis of the Possibility of Burning and Co-firing Oats in Automatic Solid Fuel Boilers, Chemical Engineering Transactions, vol. 70, s. 685–690, DOI: 10.3303/CET1870115, [indeksowane w bazie Scopus® i Web of Science®, 15 pkt – udział własny 80%]
2. **Ciupek B.**, Urbaniak R., Bartoszewicz J., 2018, Koncepcja instalacji energetycznego zagospodarowania biogazu dla dużych składowisk odpadów, Rynek Energii, nr 6 (139) s. 55–59, [11 pkt (lista 2013-2016) – udział własny 90%]
3. **Ciupek B.**, Urbaniak R., Perz K., 2018, Analysis of technical parameters of black coals used in low-power boilers, Autobusy – Technika, Eksploatacja, System Transportowe, vol. 226, no 12, s. 386–389, DOI: 10.24136/atest.2018.418, [7 pkt (lista 2013-2016) – udział własny 33%]
4. Judt W., Urbaniak R., **Ciupek B.**, Perz K., 2019, Wykorzystanie środowiska LabVIEW w realizacji badań eksperymentalnych urządzeń cieplnych, Autobusy – Technika, Eksploatacja, System Transportowe, vol. 227, no 1–2, s. 272–276, DOI: 10.24136/atest.2019.049, [5 pkt (spoza listy MNiSW) – udział własny 25%]
5. **Ciupek B.**, Urbaniak R., Judt W., 2019, Experimental Research of Changes in CO, NO<sub>x</sub> and PM Concentrations in Flue Gases During Combustion of Wood Pellets With Wheat Seeds, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 2, T. 50, s. 56–61, DOI: 10.15199/9.2019.2.3, [5 pkt (spoza listy MNiSW) – udział własny 85%]
6. **Ciupek B.**, Judt W., Urbaniak R., 2019, Experimental studies on influence of ceramic catalysts on the quality of combustion process of low power boiler, Rynek Energii, nr 4 (143) s. 78–84, [40 pkt (lista 2019) – udział własny 85%]
7. **Ciupek B.**, Judt W., Urbaniak R., Kłosowiak R., 2019, The Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides from Boilers Supplied by a Pellet under the Influence of Changes in the Air–Fuel Equivalence Ratio, Journal of Ecological Engineering, nr 20, T. 10 s. 34–38, DOI: 10.12911/22998993/112748, [40 pkt (lista 2019) – udział własny 80%]

8. Judt W., **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2019, Identification of character of flow realized in low power heating boilers, E3S Web of Conferences, vol. 128, s. 01008–1–01008–3, DOI: 10.1051/e3sconf/201912801008, [indeksowane w bazie Scopus® i Web of Science®, 5 pkt – udział własny 10%]
9. Judt W., **Ciupek B.**, Urbaniak R., 2019, Analysis of temperature distribution in the heating boiler equipped with afterburning chamber, E3S Web of Conferences, vol. 128, s. 01009–1–01009–3, DOI: 10.1051/e3sconf/201912801009, [indeksowane w bazie Scopus® i Web of Science®, 5 pkt – udział własny 10%]
10. **Ciupek B.**, Judt W., Urbaniak R., 2019, Tests of changes in the resistance of heating water flow in the home heating system, E3S Web of Conferences, vol. 128, s. 01010–1–01010–4, DOI: 10.1051/e3sconf/201912801010, [indeksowane w bazie Scopus® i Web of Science®, 5 pkt – udział własny 85%]
11. **Ciupek B.**, Gołoś K., 2020, Concentration of Nitrogen Oxides when Burning Wood Pellets of Various Origins, Journal of Ecological Engineering, nr 21, T. 5 s. 229–233, DOI: 10.12911/22998993/123121, [40 pkt (lista 2019) – udział własny 85%]
12. Kurc B., Lijewski P., Rymaniak Ł., Fuć P., Pigłowska M., Urbaniak R., **Ciupek B.**, 2020, High–Energy Solid Fuel Obtained from Carbonized Rice Starch, Energies, vol. 13, no. 16, s.4096–1–17, DOI: 10.3390/en13164096, [Czasopismo indeksowane w JCR IF – 3,004, 140 pkt – udział własny 14,28%]
13. **Ciupek B.**, Gołoś K., Bartoszewicz J., 2021, Wpływ układu filtracyjno-katalitycznego na parametry emisyjne kotłów małej mocy zasilanych pelletem drzewnym, Przemysł Chemiczny, nr 3, T. 100 s. 221–224, DOI: 10.15199/62.2021.3.1, [Czasopismo indeksowane w JCR IF – 0,464, 40 pkt – udział własny 70%]

## Załącznik 5

1. Kopie certyfikatów i zaświadczeń potwierdzające odbyte szkolenia.
2. Kopie potwierdzeń złożenia zgłoszeń patentowych do Urzędu Patentowego RP.
3. Kopie kart tematów badawczych oraz zaświadczeń potwierdzających realizację prac B+R na rzecz przemysłu.
4. Kopie dokumentów potwierdzających otrzymane nagrody i dokonania.



**MAHLE**

*Driven by performance*

# CERTIFICATE

## MAHLE

### Rozwój technologii seryjnych silników spalinowych

Świadectwo uczestnictwa w szkoleniu technicznym dla:

**BARTOSZ CIUPEK**

*04. kwietnia 2016, Poznań*

#### Zakres szkolenia:

- Ewolucja tłoków silników spalinowych – od tłoka aluminiowego do stalowego.
- Ewolucja tulei cylindrowych – od żeliwa do Nicasilu.
- Nowości w zakresie filtracji mediów.
- Ewolucja układów chłodzenia powietrza doładowania.



*Maciej Hadryś*

Serwis Techniczny MAHLE Aftermarket

**MAHLE**<sup>®</sup>  
**ORIGINAL**



# ZAŚWIADCZENIE

Pan/Pani Bartosz Ciupek

w dniu 23. października 2017 r.  
uczestniczył/a w seminarium pt.:

„Praktyczne publikowanie w otwartym dostępie”

Organizator:

Biblioteka Politechniki Poznańskiej

Dyrektor Biblioteki  
Politechniki Poznańskiej

  
mgr Małgorzata Furgal



**Biblioteka**  
Politechniki Poznańskiej





Certyfikat uczestnictwa

# Bartosz Ciupek

UKOŃCZYŁ(-A) WEBINAR

## WEBINARIUM BMP: Gaz w energetyce i ciepłownictwie



ORGANIZATOR



budujemy możliwości  
porozumienia



Certyfikat uczestnictwa

# Bartosz Ciupek

UKOŃCZYŁ(-A) WEBINAR

**WEBINARIUM BMP: Efektywność energetyczna w  
Przemysle Spożywczym – edycja czerwiec**



ORGANIZATOR



budujemy możliwości  
porozumienia

# ZAŚWIADCZENIE

Pan **BARTOSZ CIUPEK**

Ukończył Szkolenie  
ZARZĄDZANIE ZADANIAMI W CZASIE  
zorganizowane przez Politechnikę Poznańską

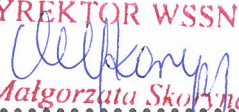
w ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską  
Europejski Fundusz Społeczny:  
Uczelnia zintegrowana na przyszłość POWR.03.05.00-00-Z041/17.

prowadzone przez  
Niepubliczny Ośrodek Kształcenia Ustawicznego  
Wielkopolska Szkoła Skutecznej Nauki,  
Środa Wielkopolska, os. Młodych 5/17.

Łączny wymiar zajęć: 26 godzin



Podpis trenera

DYREKTOR WSSN  
  
mgr Małgorzata Skoryna  
Podpis organizatora

Poznań., dnia 24.09.2021 r.

Wielkopolska Szkoła Skutecznej Nauki  
WSSN  
63-000 Środa Wlkp., Os. Młodych 5/17  
NIP 763-127-54-02 REGON 300700060  
tel. 604 058 727

Nr 182/PP/ 2020 r.



**Kancelaria Ogólna**

Warszawa, 2021-01-28

Nasz znak: P.436788

Wasz znak: Pat/2247

**POTWIERDZENIE**

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia 2021-01-28 przyjęto w formie elektronicznej wnioski o udzielenie patentu na wynalazek:

**Wkład paleniskowy pozycjonująco-napowietrzający złoża paliwa stałego spalane w palnikach retortowych albo sztokerowych**

Zgłoszenie oznaczono numerem: **P.436788**

**[WIPO ST 10/C PL436788]**

Zgłaszający: **POLITECHNIKA POZNAŃSKA, Poznań, Polska**

Dokument wystawiony automatycznie przez system teleinformatyczny UPRP.

**Pouczenie:**

1. Strony oraz ich przedstawiciele i pełnomocnicy mają obowiązek zawiadomić Urząd o każdej zmianie swojego adresu. W razie zaniedbania tego obowiązku doręczenie pisma pod dotychczasowym adresem ma skutek prawny (art. 41 kpa).
2. O zgłoszeniu wynalazku Urząd Patentowy dokonuje ogłoszenia niezwłocznie po upływie 18 miesięcy od daty pierwszeństwa do uzyskania patentu. Zgłaszający może w okresie 12 miesięcy od daty pierwszeństwa złożyć wnioski o dokonanie ogłoszenia w terminie wcześniejszym (art. 43 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2017 r. poz. 776 z późn. zm.).
3. W korespondencji należy powoływać się na nr P.436788.

**Klauzula informacyjna:**

Zgodnie z art. 13 ust. 1 i 2 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej informuje, że:

1. Administratorem Pani/Pana danych osobowych jest Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej z siedzibą w Warszawie, adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, skrytka pocztowa 203;
2. Inspektor Ochrony Danych, dane kontaktowe: adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, tel. bezpośredni (022) 579 00 25, fax (022) 579 00 01, e-mail: iod@uprp.pl;

3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu realizowania zadań Urzędu Patentowego RP określonych przepisami ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej;
4. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych osobowych jest ustawa z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej, rozporządzenia wykonawcze do ww. ustawy, umowy międzynarodowe oraz art. 6 ust. 1 lit. c RODO;
5. Pani/Pana dane osobowe mogą być przekazywane do podmiotów publicznych na zasadach obowiązujących w przepisach prawa oraz organizacjom międzynarodowym i organom unijnym, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa i umowami międzynarodowymi, po upływie terminów zastrzeżonych dla nieujawniania informacji o zgłoszeniu;
6. Pani/Pana dane osobowe będą przechowywane przez okres zgodny z zasadami archiwizacji dokumentów w Urzędzie Patentowym RP;
7. Posiada Pani/Pan prawo żądania dostępu do treści swoich danych osobowych, prawo ich sprostowania oraz prawo do ograniczenia ich przetwarzania;
8. Przysługuje Pani/Panu prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego właściwego w zakresie ochrony danych osobowych gdy uzna Pani/Pan, że przetwarzanie Pani/Pana danych osobowych narusza przepisy RODO;
9. Podanie przez Panią/Pana danych osobowych jest wymogiem ustawowym niezbędnym do dalszego procedowania przez Urząd Patentowy RP.



**Kancelaria Ogólna**

Warszawa, 2021-01-28

Nasz znak: P.436789

Wasz znak: Pat/2263

**POTWIERDZENIE**

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia 2021-01-28 przyjęto w formie elektronicznej wnioski o udzielenie patentu na wynalazek:

**Układ pozycjonowania kanałów napowietrzających komorę paleniskową palnika retortowego zasilanego paliwami stałymi**

Zgłoszenie oznaczono numerem: **P.436789**

**[WIPO ST 10/C PL436789]**

Zgłaszający: **POLITECHNIKA POZNAŃSKA, Poznań, Polska**  
**ELEKTRORECYKLING POLSKA SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ**  
**ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Poznań, Polska**  
**ECOPROTECH SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ,**  
**Szczecin, Polska**

Dokument wystawiony automatycznie przez system teleinformatyczny UPRP.

**Pouczenie:**

1. Strony oraz ich przedstawiciele i pełnomocnicy mają obowiązek zawiadomić Urząd o każdej zmianie swojego adresu. W razie zaniedbania tego obowiązku doręczenie pisma pod dotychczasowym adresem ma skutek prawny (art. 41 kpa).
2. O zgłoszeniu wynalazku Urząd Patentowy dokonuje ogłoszenia niezwłocznie po upływie 18 miesięcy od daty pierwszeństwa do uzyskania patentu. Zgłaszający może w okresie 12 miesięcy od daty pierwszeństwa złożyć wnioski o dokonanie ogłoszenia w terminie wcześniejszym (art. 43 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2017 r. poz. 776 z późn. zm.).
3. W korespondencji należy powoływać się na nr P.436789.

**Klauzula informacyjna:**

Zgodnie z art. 13 ust. 1 i 2 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej informuje, że:

1. Administratorem Pani/Pana danych osobowych jest Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej z siedzibą w Warszawie, adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, skrytka pocztowa 203;
2. Inspektor Ochrony Danych, dane kontaktowe: adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, tel. bezpośredni (022) 579 00 25, fax (022) 579 00 01, e-mail: iod@uprp.pl;
3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu realizowania zadań Urzędu Patentowego RP określonych przepisami ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej;
4. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych osobowych jest ustawa z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej, rozporządzenia wykonawcze do ww. ustawy, umowy międzynarodowe oraz art. 6 ust. 1 lit. c RODO;
5. Pani/Pana dane osobowe mogą być przekazywane do podmiotów publicznych na zasadach obowiązujących w przepisach prawa oraz organizacjom międzynarodowym i organom unijnym, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa i umowami międzynarodowymi, po upływie terminów zastrzeżonych dla nieujawniania informacji o zgłoszeniu;
6. Pani/Pana dane osobowe będą przechowywane przez okres zgodny z zasadami archiwizacji dokumentów w Urzędzie Patentowym RP;
7. Posiada Pani/Pan prawo żądania dostępu do treści swoich danych osobowych, prawo ich sprostowania oraz prawo do ograniczenia ich przetwarzania;
8. Przysługuje Pani/Panu prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego właściwego w zakresie ochrony danych osobowych gdy uzna Pani/Pan, że przetwarzanie Pani/Pana danych osobowych narusza przepisy RODO;
9. Podanie przez Panią/Pana danych osobowych jest wymogiem ustawowym niezbędnym do dalszego procedowania przez Urząd Patentowy RP.





**Kancelaria Ogólna**

Warszawa, 2021-06-24

Nasz znak: P.438249

Wasz znak: Pat/2302

**POTWIERDZENIE**

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia 2021-06-24 przyjęto w formie elektronicznej wnioski o udzielenie patentu na wynalazek:

**Układ recyrkulacji spalin dla kotłów grzewczych małej mocy na paliwa stałe**

Zgłoszenie oznaczono numerem: **P.438249**

**[WIPO ST 10/C PL438249]**

Zgłaszający: **POLITECHNIKA POZNAŃSKA, Poznań, Polska**

Dokument wystawiony automatycznie przez system teleinformatyczny UPRP.

**Pouczenie:**

1. Strony oraz ich przedstawiciele i pełnomocnicy mają obowiązek zawiadomić Urząd o każdej zmianie swojego adresu. W razie zaniedbania tego obowiązku doręczenie pisma pod dotychczasowym adresem ma skutek prawny (art. 41 kpa).
2. O zgłoszeniu wynalazku Urząd Patentowy dokonuje ogłoszenia niezwłocznie po upływie 18 miesięcy od daty pierwszeństwa do uzyskania patentu. Zgłaszający może w okresie 12 miesięcy od daty pierwszeństwa złożyć wnioski o dokonanie ogłoszenia w terminie wcześniejszym (art. 43 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2021 r. poz. 324).
3. W korespondencji należy powoływać się na nr P.438249.

**Klauzula informacyjna:**

Zgodnie z art. 13 ust. 1 i 2 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej informuje, że:

1. Administratorem Pani/Pana danych osobowych jest Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej z siedzibą w Warszawie, adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, skrytka pocztowa 203;
2. Inspektor Ochrony Danych, dane kontaktowe: adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, tel. bezpośredni (022) 579 00 25, fax (022) 579 00 01, e-mail: iod@uprp.pl;
3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu realizowania zadań Urzędu Patentowego RP określonych przepisami ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej;

4. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych osobowych jest ustawa z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej, rozporządzenia wykonawcze do ww. ustawy, umowy międzynarodowe oraz art. 6 ust. 1 lit. c RODO;
5. Pani/Pana dane osobowe mogą być przekazywane do podmiotów publicznych na zasadach obowiązujących w przepisach prawa oraz organizacjom międzynarodowym i organom unijnym, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa i umowami międzynarodowymi, po upływie terminów zastrzeżonych dla nieujawniania informacji o zgłoszeniu;
6. Pani/Pana dane osobowe będą przechowywane przez okres zgodny z zasadami archiwizacji dokumentów w Urzędzie Patentowym RP;
7. Posiada Pani/Pan prawo żądania dostępu do treści swoich danych osobowych, prawo ich sprostowania oraz prawo do ograniczenia ich przetwarzania;
8. Przysługuje Pani/Panu prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego właściwego w zakresie ochrony danych osobowych gdy uzna Pani/Pan, że przetwarzanie Pani/Pana danych osobowych narusza przepisy RODO;
9. Podanie przez Panią/Pana danych osobowych jest wymogiem ustawowym niezbędnym do dalszego procedowania przez Urząd Patentowy RP.



**Kancelaria Ogólna**

Warszawa, 2021-06-24

Nasz znak: P.438250

Wasz znak: Pat/2278

**POTWIERDZENIE**

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia 2021-06-24 przyjęto w formie elektronicznej wnioski o udzielenie patentu na wynalazek:

**Układ dozowania wody amoniakalnej dla palników retortowych kotłów niskotemperaturowych**

Zgłoszenie oznaczono numerem: **P.438250**

**[WIPO ST 10/C PL438250]**

Zgłaszający: **POLITECHNIKA POZNAŃSKA, Poznań, Polska**

Dokument wystawiony automatycznie przez system teleinformatyczny UPRP.

**Pouczenie:**

1. Strony oraz ich przedstawiciele i pełnomocnicy mają obowiązek zawiadomić Urząd o każdej zmianie swojego adresu. W razie zaniedbania tego obowiązku doręczenie pisma pod dotychczasowym adresem ma skutek prawny (art. 41 kpa).
2. O zgłoszeniu wynalazku Urząd Patentowy dokonuje ogłoszenia niezwłocznie po upływie 18 miesięcy od daty pierwszeństwa do uzyskania patentu. Zgłaszający może w okresie 12 miesięcy od daty pierwszeństwa złożyć wnioski o dokonanie ogłoszenia w terminie wcześniejszym (art. 43 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2021 r. poz. 324).
3. W korespondencji należy powoływać się na nr P.438250.

**Klauzula informacyjna:**

Zgodnie z art. 13 ust. 1 i 2 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej informuje, że:

1. Administratorem Pani/Pana danych osobowych jest Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej z siedzibą w Warszawie, adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, skrytka pocztowa 203;
2. Inspektor Ochrony Danych, dane kontaktowe: adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, tel. bezpośredni (022) 579 00 25, fax (022) 579 00 01, e-mail: iod@uprp.pl;
3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu realizowania zadań Urzędu Patentowego RP określonych przepisami ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej;

4. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych osobowych jest ustawa z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej, rozporządzenia wykonawcze do ww. ustawy, umowy międzynarodowe oraz art. 6 ust. 1 lit. c RODO;
5. Pani/Pana dane osobowe mogą być przekazywane do podmiotów publicznych na zasadach obowiązujących w przepisach prawa oraz organizacjom międzynarodowym i organom unijnym, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa i umowami międzynarodowymi, po upływie terminów zastrzeżonych dla nieujawniania informacji o zgłoszeniu;
6. Pani/Pana dane osobowe będą przechowywane przez okres zgodny z zasadami archiwizacji dokumentów w Urzędzie Patentowym RP;
7. Posiada Pani/Pan prawo żądania dostępu do treści swoich danych osobowych, prawo ich sprostowania oraz prawo do ograniczenia ich przetwarzania;
8. Przysługuje Pani/Panu prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego właściwego w zakresie ochrony danych osobowych gdy uzna Pani/Pan, że przetwarzanie Pani/Pana danych osobowych narusza przepisy RODO;
9. Podanie przez Panią/Pana danych osobowych jest wymogiem ustawowym niezbędnym do dalszego procedowania przez Urząd Patentowy RP.

<p>POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ skrytka pocztowa 5 Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>							
<p>Numer tematu: <b>05/56/PRJG/5034</b></p>	<p>Podzlecenie do tematu nr:</p>	<p>Zródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*</p> <p>Pracę kwalifikuję jako:</p> <p>Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* <u>U – usługowe</u></p> <p>* odpowiednie zaznaczyć</p>							
<p>TEMAT: <b>Ocena możliwości wykorzystania Analizatora Jakości Procesu Spalania BCA-01 do regulacji procesu spalania paliw stałych pochodzenia węglowego w kotłach o mocach cieplnych z zakresu 100 do 3000 kW.</b></p>									
<p>Słowa kluczowe: analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe</p>									
<p>Zamawiający: BRAGER Sp. z o.o. Topola Osiedle ul. Sportowa 20 63-421 Przygodzice Topola</p>									
<p>Imienny skład zespołu badawczego: mgr.inż. Wojciech Judt mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. adam Nygard</p>									
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>jednostka</th> <th>rodzaj i zakres pracy</th> <th>wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---		
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---									
<p>Podział pracy na etapy: określenie etapu praca jednoetapowa</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">termin</th> </tr> <tr> <th>rozpoczęcia</th> <th>zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>09.01.2018 r.</td> <td>25.01.2018 r.</td> </tr> </tbody> </table>		termin		rozpoczęcia	zakończenia	09.01.2018 r.	25.01.2018 r.
termin									
rozpoczęcia	zakończenia								
09.01.2018 r.	25.01.2018 r.								
<p>Forma zakończenia pracy: raport z badań</p>									

POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ Jednostka organizacyjna		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>							
Numer tematu:  <b>05/56/PRJG/5046</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Źródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*  Pracę kwalifikuję jako:  Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* <u>U – usługowe</u>  * odpowiednie zaznaczyć							
TEMAT:  <b>Badanie analizy spalin kotła BioMax PLUS 20 kW.</b>									
Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe									
Zamawiający:  LUMO Technika Grzewcza sp. z o.o., ul. Główna 51B, 62-050 Mosina-Krosno									
Topola									
Imienny skład zespołu badawczego:  dr inż. Robert Kłowskiak mgr inż. Bartosz Ciupek									
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">jednostka</th> <th style="width: 50%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 25%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---		
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---									
Podział pracy na etapy: określenie etapu  praca jednoetapowa		termin <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">rozpoczęcia</th> <th style="width: 50%;">zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">17.05.2018 r.</td> <td style="text-align: center;">25.05.2018 r.</td> </tr> </tbody> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	17.05.2018 r.	25.05.2018 r.		
rozpoczęcia	zakończenia								
17.05.2018 r.	25.05.2018 r.								
Forma zakończenia pracy:  raport z badań									

<p style="text-align: center;">POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ Jednostka organizacyjna</p>		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>										
Numer tematu:  <b>05/56/PRJG/5051</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Źródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*  Pracę kwalifikuję jako:  Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* <u>U – usługowe</u>  * odpowiednie zaznaczyć										
TEMAT:  <p style="text-align: center;"><b>Analiza spalin kotłów z typoszeregu Vulcanus.</b></p>												
Słowa kluczowe:  <p style="text-align: center;">analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe</p>												
Zamawiający:  <p style="text-align: center;">LUMO Technika Grzewcza sp. z o.o., ul. Główna 51B, 62-050 Mosina-Krosno</p>												
Topola Imienny skład zespołu badawczego:  <p style="text-align: center;">dr inż. Rafał Urbaniak mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt</p>												
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">jednostka</th> <th style="width: 50%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 25%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---					
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.										
---												
Podział pracy na etapy: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;">określenie etapu</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">termin</th> </tr> <tr> <th></th> <th style="width: 20%;">rozpoczęcia</th> <th style="width: 20%;">zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">praca jednoetapowa</td> <td style="text-align: center;">14.06.2018 r.</td> <td style="text-align: center;">20.06.2018 r.</td> </tr> </tbody> </table>		określenie etapu	termin			rozpoczęcia	zakończenia	praca jednoetapowa	14.06.2018 r.	20.06.2018 r.		
określenie etapu	termin											
	rozpoczęcia	zakończenia										
praca jednoetapowa	14.06.2018 r.	20.06.2018 r.										
Forma zakończenia pracy:  <p style="text-align: center;">raport z badań</p>												

<p style="text-align: center;">POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ skrytka pocztowa 5 Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>					
<p>Numer tematu: <b>05/56/PRJG/5139</b></p>	<p>Podzlecenie do tematu nr:</p>	<p>Zródło finansowania prac:          BW – badania własne*          DS – działalność statutowa*          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*  <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u>          i zlecenia z zagranicy*          Pracę kwalifikuję jako:          Badania naukowe:          Bp – podstawowe*          Bs – stosowane*          Br – <u>badawczo-rozwojowa*</u>          U – usługowe          * odpowiednie zaznaczyć</p>					
<p>TEMAT: <b>Wykonanie badań przemysłowych i prac rozwojowych pod tytułem "Innowacyjny kocioł kondensacyjny na pellet"</b></p>							
<p>Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe</p>							
<p>Zamawiający:  Termotechnika Michał Kotelba ul. Postępu 190 A Zgorzała, 05-500 Piaseczno</p>							
<p>Imienny skład zespołu badawczego:  dr inż. Rafał Urbaniak mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt</p>							
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce: jednostka                      rodzaj i zakres pracy</p>		<p>wartość w zł.</p>					
<p>---</p>							
<p>Podział pracy na etapy: określenie etapu</p>		<p style="text-align: center;">termin</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">rozpoczęcia</td> <td style="width: 50%;">zakończenia</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25.02.2019</td> <td style="text-align: center;">30.04.2019 r.</td> </tr> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	25.02.2019	30.04.2019 r.
rozpoczęcia	zakończenia						
25.02.2019	30.04.2019 r.						
<p>Forma zakończenia pracy:  opracowanie raportu</p>							

NIP: 7162309085



<p style="text-align: center;">POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ skrytka pocztowa 5 Jednostka organizacyjna</p>		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>										
Numer tematu:  <b>05/56/PRJG/5141</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Źródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*  Pracę kwalifikuję jako:  Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – <u>badawczo-rozwojową*</u> U – usługowe  * odpowiednio zaznaczyć										
TEMAT:  <b>" Możliwość poprawy jakości procesu spalania kotła Vulcanus Plus przy zastosowaniu katalizatorów ceramicznych"</b>												
Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe												
Zamawiający:  <p style="text-align: center;">LUMO Technika Grzewcza sp. z o.o., ul. Główna 51B, 62-050 Mosina-Krosno</p>												
Topola												
Imienny skład zespołu badawczego:  <p style="text-align: center;">dr inż. Rafał Urbaniak mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt</p>												
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">jednostka</th> <th style="width: 40%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 30%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---					
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.										
---												
Podział pracy na etapy: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;">określenie etapu</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">termin</th> </tr> <tr> <th></th> <th style="width: 20%;">rozpoczęcia</th> <th style="width: 20%;">zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">praca jednoetapowa</td> <td style="text-align: center;">04.03.2019 r.</td> <td style="text-align: center;">15.03.2019 r.</td> </tr> </tbody> </table>		określenie etapu	termin			rozpoczęcia	zakończenia	praca jednoetapowa	04.03.2019 r.	15.03.2019 r.		
określenie etapu	termin											
	rozpoczęcia	zakończenia										
praca jednoetapowa	04.03.2019 r.	15.03.2019 r.										
Forma zakończenia pracy:  <p style="text-align: center;">raport z badań</p>												

NIP:7772808421

<p>POLITECHNIKA POZNAŃSKA Katedra Techniki Ciepłej ul. Piotrowo 3 60-965 POZNAŃ Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>	
<p>Numer tematu: <b>05/56/PRJG/5152</b></p>	<p>Podzlecenie do tematu nr:</p>	<p>Zródło finansowania prac:          BW – badania własne*          DS – działalność statutowa*          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*  <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u>          i zlecenia z zagranicy*          Pracę kwalifikuję jako:          Badania naukowe:          Bp – podstawowe*          Bs – stosowane*          Br – <u>badawczo-rozwojową*</u>          U – usługowe</p>	
<p>TEMAT: <b>Opinia o innowacyjności kotła na zrębkę drzewną MaxPell GL 120.</b></p>		<p>* odpowiednie zaznaczyć</p>	
<p>Słowa kluczowe: analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe</p>			
<p>Zamawiający: Przedsiębiorstwo Produkcyjne Heiztechnik Spółka z o.o. Sp. K. ul. Drogowców 7, 83-250 Skarszewy</p>			
<p>Imienny skład zespołu badawczego: dr hab. inż. Jarosław Bartoszewicz prof. PP mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt</p>			
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce: jednostka                      rodzaj i zakres pracy                      wartość w zł. ---</p>			
<p>Podział pracy na etapy: określenie etapu</p>		<p>termin rozpoczęcia                      zakończenia 02.07.2019                      04.07.2019 r.</p>	
<p>Forma zakończenia pracy: opracowanie raportu</p>			

Jednostka organizacyjna		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>							
Numer tematu:  <b>05/56/PRJG/5154</b>	Podzlecenie do tematu nr:	<b>Zródło finansowania prac:</b> BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*  Pracę kwalifikuję jako:  Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – <u>badawczo-rozwojową*</u> U – usługowe  * odpowiednie zaznaczyć							
<b>TEMAT:</b>  <b>"Ekspertyza techniczna kotła pelletowego o mocy 10 kW na zgodność z obowiązującymi normami i dyrektywami"</b>									
Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe									
<b>Zamawiający:</b> <div style="text-align: center;">LUMO Technika Grzewcza sp. z o.o., ul. Główna 51B, 62-050 Mosina-Krosno</div>									
<b>Topola</b> <b>Imienny skład zespołu badawczego:</b>  <div style="text-align: center;">dr inż. Rafał Urbaniak mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt</div>									
<b>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">jednostka</th> <th style="width: 33%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 34%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---		
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---									
<b>Podział pracy na etapy:</b> <div style="text-align: center;">określenie etapu</div>		<b>termin</b>							
praca jednoetapowa		rozpoczęcia 01.08.2019 r.	zakończenia 26.08.2019 r.						
<b>Forma zakończenia pracy:</b>  <div style="text-align: center;">raport z badań</div>									

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
 Instytut Energetyki Ciepłej  
 ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań  
 DYREKTOR  
 Instytutu Energetyki Ciepłej  
 prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak  
 Jednostka organizacyjna

**KARTA TEMATU  
 BADAWCZEGO**

Numer tematu: <b>0712/PRJG/5169</b>		Podzlecenie do tematu nr:		<b>Zródło finansowania prac:</b> BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy* Pracę kwalifikuję jako: Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* U – usługowe * odpowiednie zaznaczyć	
<b>TEMAT:</b> <b>Opinia o innowacyjności pompy ciepła Calla Verde M20 Comfort.</b>					
Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, pompy ciepła, górne źródła ciepła.					
<b>Zamawiający:</b> Przedsiębiorstwo Produkcyjne Heiztechnik Spółka z o.o. Sp. K. ul. Drogowców 7, 83-250 Skarszewy					
<b>Imienny skład zespołu badawczego:</b> dr inż. Robert Kłosowiak mgr inż. Bartosz Ciupek mgr inż. Wojciech Judt					
<b>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</b>					
jednostka		rodzaj i zakres pracy		wartość w zł.	
---					
<b>Podział pracy na etapy:</b> określenie etapu				<b>termin</b>	
				rozpoczęcia	zakończenia
				10.02.2020	14.02.2020 r.
<b>Forma zakończenia pracy:</b> opracowanie opinii					

<p><b>Jednostka organizacyjna</b></p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>					
<p>Numer tematu:  <b>0712/PRJG/5189</b></p>	<p>Podzlecenie do tematu nr:</p>	<p>Zródło finansowania prac:          BW – badania własne*          DS – działalność statutowa*          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*  <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u>          i zlecenia z zagranicy*          Pracę kwalifikuję jako:          Badania naukowe:          Bp – podstawowe*          Bs – stosowane*          Br – badawczo-rozwojową*  <u>U – usługowe</u></p>					
<p>TEMAT:  <b>Ocena zasadności stosowania reaktora katalitycznego wraz z filtrem cząstek stałych do celów ograniczenia emisji substancji szkodliwych z kotłów co. na paliwa stałe.</b></p>		<p>* odpowiednie zaznaczyć</p>					
<p>Słowa kluczowe:           analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe</p>							
<p>Zamawiający:           Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych          44-100 Gliwice, ul. Sowińskiego 5</p>							
<p>Imienny skład zespołu badawczego:           mgr inż. Bartosz Ciupek - kierownik projektu          mgr inż. Wojciech Judt</p>							
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:          jednostka                      rodzaj i zakres pracy                      wartość w zł.           ---</p>							
<p>Podział pracy na etapy:          określenie etapu</p>		<p>termin</p> <table border="1"> <tr> <td>rozpoczęcia</td> <td>zakończenia</td> </tr> <tr> <td>08.10.2020</td> <td>26.10.2020 r.</td> </tr> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	08.10.2020	26.10.2020 r.
rozpoczęcia	zakończenia						
08.10.2020	26.10.2020 r.						
<p>Forma zakończenia pracy:           protokół wzorcowania</p>							

Jednostka organizacyjna		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>							
Numer tematu:  <b>0712/PRJG/5191</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Zródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*							
<b>TEMAT:</b> <b>Analiza możliwości zastosowania automatycznego układu regulacji pracującego w oparciu o Analizator BCA-02 do poprawy parametrów energetyczno - emisyjnych kotłów małej mocy na paliwa stałe w warunkach rzeczywistej eksploatacji.</b>		Pracę kwalifikuję jako:  Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* <u>U – usługowe</u>							
Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania, kotły na paliwa stałe		* odpowiednie zaznaczyć							
Zamawiający: <div style="text-align: center;">BRAGER Sp. z o.o. ul. Rolna 11 63-300 Pleszew</div>									
Topola Imienny skład zespołu badawczego: <div style="text-align: center;">mgr inż. Bartosz Ciupek - kierownik dr hab. inż. prof. PP Jarosław Bartoszewicz dr.inż. Radosław Jankowski mgr.inż. Wojciech Judt</div>									
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">jednostka</th> <th style="width: 40%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 30%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---		
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---									
Podział pracy na etapy: <div style="text-align: center;">określenie etapu</div>		termin							
		rozpoczęcia	zakończenia						
praca jednoetapowa		21.10.2020 r.	27.10.2020 r.						
Forma zakończenia pracy: <div style="text-align: center;">raport z badań</div>									

POLITECHNIKA POZNAŃSKA Instytut Energetyki Ciepłej ul. Piotrowa 3, 60-965 Poznań Jednostka organizacyjna		<b>KARTA TEMATU          BADAWCZEGO</b>							
Numer tematu:  <b>0712/PRJG/5209</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Źródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy*  Pracę kwalifikuję jako: Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* <u>U – usługowe</u>  * odpowiednie zaznaczyć							
TEMAT:  <b>Badanie: wartości spalania; ciepła spalania paliwa;          określenie parametrów w stanie roboczym.</b>									
Słowa kluczowe:  analiza jakości spalania									
Zamawiający:  ASKET Roman Długi ul. Forteczna 12A 61-362 Poznań									
Imienny skład zespołu badawczego:  dr inż. Robert Kłosowiak - Kierownik mgr inż. Bartosz Ciupek									
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">jednostka</th> <th style="width: 40%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 30%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---		
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---									
Podział pracy na etapy: określenie etapu  praca jednoetapowa		termin <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">rozpoczęcia</th> <th style="width: 50%;">zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">22.04.2021 r.</td> <td style="text-align: center;">29.04.2021 r.</td> </tr> </tbody> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	22.04.2021 r.	29.04.2021 r.		
rozpoczęcia	zakończenia								
22.04.2021 r.	29.04.2021 r.								
Forma zakończenia pracy:  protokół z badania próbki									

Jednostka organizacyjna		KARTA TEMATU BADAWCZEGO	
Numer tematu: <b>0712/PRJG/5216</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Źródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* <u>JG, ZG – jednostki gospodarcze</u> i zlecenia z zagranicy* Pracę kwalifikuję jako: Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* U – <u>usługowe</u> * odpowiednie zaznaczyć	
TEMAT:  <b>Badanie i opinia o innowacyjności kotła FLAT 11.</b>			
Słowa kluczowe:  odnawialne źródła energii, pompy ciepła, górne źródła ciepła.			
Zamawiający:  Przedsiębiorstwo Produkcyjne Heiztechnik Spółka z o.o. Sp. K. ul. Drogowców 7, 83-250 Skarszewy			
Imienny skład zespołu badawczego:  mgr inż. Bartosz Ciupek - kierownik projektu mgr inż. Wojciech Judt			
Przewidywane podzlecenia i usługi obce:		wartość w zł.	
jednostka	rodzaj i zakres pracy		
---			
Podział pracy na etapy: określenie etapu		rozpoczęcia	termin zakończenia
		28.07.2021	30.07.2021 r.
Forma zakończenia pracy:  opracowanie opinii			



Poznań dnia: 2021-10-06

<p><b>POLITECHNIKA POZNAŃSKA</b> Instytut Energetyki Ciepłej ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań</p> <p>Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>							
Numer tematu: <b>05/56/DSMK/5056</b>	Podzlecenie do tematu nr:	<p>Źródło finansowania prac:          BW – badania własne*          DS – działalność statutowa*          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*          JG, ZG – jednostki gospodarcze i zlecenia z zagranicy*          Pracę kwalifikuję jako:          Badania naukowe:  <u>Bp – podstawowe*</u>          Bs – stosowane*          Br – badawczo-rozwojową*          U – usługowe</p>							
<p>TEMAT:</p> <p><b>Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych.</b></p>		<p>* odpowiednie zaznaczyć</p>							
<p>Słowa kluczowe:</p> <p>modelowanie, przepływ, kanał, chropowatość</p>									
<p>Zamawiający: Dziekan WMRiT</p>									
<p>Imienny skład zespołu badawczego:</p> <p><b>dr inż. Damian Joachimiak - kierownik</b>  <b>dr inż. Robert Kłosowiak, dr inż. Magda Joachimiak, mgr inż. Adam Nygard</b>  <b>mgr inż. Wojciech Judt, mgr inż. Adam Rojewski, mgr inż. Bartosz Ciupek</b></p>									
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th>jednostka</th> <th>rodzaj i zakres pracy</th> <th>wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---	---	---
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---	---	---							
<p>Podział pracy na etapy:</p> <p>określenie etapu</p> <p><b>zebranie i analiza literatury</b></p>		<p>termin</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th>rozpoczęcia</th> <th>zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2018-07-12</td> <td>2018-11-30</td> </tr> </tbody> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	2018-07-12	2018-11-30		
rozpoczęcia	zakończenia								
2018-07-12	2018-11-30								
<p>Forma zakończenia pracy:</p> <p>Wyniki zostaną opublikowane w czasopiśmie lub na konferencji naukowej</p>									

Poznań dnia: 2021-10-06

<p><b>POLITECHNIKA POZNAŃSKA</b> Instytut Energetyki Ciepłej ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań</p> <p>Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>							
Numer tematu: <b>05/56/SBAD/5148</b>	Podzlecenie do tematu nr:	<p>Zródło finansowania prac:          BW – badania własne*          DS – działalność statutowa*          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*          JG, ZG – jednostki gospodarcze          i zlecenia z zagranicy*</p> <p>Pracę kwalifikuję jako:</p> <p>Badania naukowe:          Bp – podstawowe*          Bs – stosowane*          Br – badawczo-rozwojową*          U – usługowe</p> <p>* odpowiednie zaznaczyć</p>							
<p>TEMAT:</p> <p>Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych.</p>									
<p>Słowa kluczowe:</p> <p>wymiana ciepła, kotły grzewcze, symulacje SFD, eksploatacja urządzeń</p>									
<p>Zamawiający: Dziekan WIT</p>									
<p>Imienny skład zespołu badawczego:</p> <p><b>dr inż. Robert Kłowskiak, dr inż. Damian Joachimiak,</b>  <b>dr inż. Magda Joachimiak,</b>  <b>Mgr inż. Adam Nygard, mgr inż. Wojciech Judt,</b>  <b>mgr inż. Adam Rojewski, mgr inż. Bartosz Ciupek</b></p>									
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th>jednostka</th> <th>rodzaj i zakres pracy</th> <th>wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---	---	---
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---	---	---							
<p>Podział pracy na etapy:</p> <p>określenie etapu</p>		<p>termin</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th>rozpoczęcia</th> <th>zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2019-05-12</td> <td>2018-09-30</td> </tr> </tbody> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	2019-05-12	2018-09-30		
rozpoczęcia	zakończenia								
2019-05-12	2018-09-30								
<p>Forma zakończenia pracy:</p> <p>złożenie pisemnego sprawozdania</p>									

Poznań dnia: 2021-10-06

<p><b>POLITECHNIKA POZNAŃSKA</b> Instytut Energetyki Ciepłej ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań</p> <p>Jednostka organizacyjna</p>		<p><b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b></p>							
Numer tematu: <b>0712/SBAD/5148</b>	Podzlecenie do tematu nr:	<p>Zródło finansowania prac:          BW – badania własne*  <u>DS – działalność statutowa*</u>          GR – projekty badawcze*          PZ – projekty zamawiane*          PC – projekty celowe*          PM – programy międzynarodowe*          JG, ZG – jednostki gospodarcze          i zlecenia z zagranicy*</p> <p>Pracę kwalifikuję jako:</p> <p>Badania naukowe:  <u>Bp – podstawowe*</u>          Bs – stosowane*          Br – badawczo-rozwojową*          U – usługowe</p> <p>* odpowiednie zaznaczyć</p>							
<p>TEMAT:</p> <p>Zagadnienia przepływu ciepła i masy w urządzeniach energetycznych.</p>									
<p>Słowa kluczowe:</p> <p>wymiana ciepła, kotły grzewcze, symulacje SFD, eksploatacja urządzeń</p>									
<p>Zamawiający: Dziekan WIT</p>									
<p>Imienny skład zespołu badawczego:  <b>dr inż. Robert Kłowskiak, dr inż. Damian Joachimiak,</b>  <b>dr inż. Magda Joachimiak,</b>  <b>Mgr inż. Adam Nygard, mgr inż. Wojciech Judt,</b>  <b>mgr inż. Adam Rojewski, mgr inż. Bartosz Ciupek</b></p>									
<p>Przewidywane podzlecenia i usługi obce:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>jednostka</th> <th>rodzaj i zakres pracy</th> <th>wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---	---	---
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---	---	---							
<p>Podział pracy na etapy:</p> <p>określenie etapu</p>		<p>termin</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>rozpoczęcia</th> <th>zakończenia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2020-01-01</td> <td>2020-11-30</td> </tr> </tbody> </table>		rozpoczęcia	zakończenia	2020-01-01	2020-11-30		
rozpoczęcia	zakończenia								
2020-01-01	2020-11-30								
<p>Forma zakończenia pracy:</p> <p>złożenie pisemnego sprawozdania</p>									

Poznań dnia:

2021-10-06

<p style="text-align: center;"><b>POLITECHNIKA POZNAŃSKA</b> Instytut Energetyki Ciepłej ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań Jednostka organizacyjna</p>		<b>KARTA TEMATU BADAWCZEGO</b>							
Numer tematu: <b>0712/SBAD/5180</b>	Podzlecenie do tematu nr:	Zródło finansowania prac: BW – badania własne* DS – działalność statutowa* GR – projekty badawcze* PZ – projekty zamawiane* PC – projekty celowe* PM – programy międzynarodowe* JG, ZG – jednostki gospodarcze i zlecenia z zagranicy* Pracę kwalifikuję jako: Badania naukowe: Bp – podstawowe* Bs – stosowane* Br – badawczo-rozwojową* U – usługowe  * odpowiednie zaznaczyć							
<b>TEMAT:</b> <b>Analiza możliwości poprawy procesów ciepł- emisyjnych urządzeń grzewczych na paliwa stałe oraz urządzeń współpracujących.</b>									
Słowa kluczowe: urządzenia grzewcze									
Zamawiający: Dziekan WIŚiE									
Imienny skład zespołu badawczego:  <b>Bartosz Ciupek Kierownik</b>  W. Judt; R Urbaniak									
Przewidywane podzlecenia i usługi obce: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">jednostka</th> <th style="width: 45%;">rodzaj i zakres pracy</th> <th style="width: 30%;">wartość w zł.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> </tr> </tbody> </table>				jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.	---	---	---
jednostka	rodzaj i zakres pracy	wartość w zł.							
---	---	---							
Podział pracy na etapy: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;">określenie etapu</th> <th style="width: 40%;">termin</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">rozpoczęcia      zakończenia</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">24-06-2020      2020-11-30</td> </tr> </tbody> </table>		określenie etapu	termin		rozpoczęcia      zakończenia		24-06-2020      2020-11-30		
określenie etapu	termin								
	rozpoczęcia      zakończenia								
	24-06-2020      2020-11-30								
Forma zakończenia pracy:  Raport Publikacje									



INSTYTUT SILNIKÓW SPALINOWYCH I NAPĘDÓW

Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2207, fax +48 61 665 2204

e-mail: office\_ice@put.poznan.pl, www.put.poznan.pl

Poznań, dnia 17.09.2021 r.

## Zaświadczenie

Potwierdzam, że Pan mgr inż. Bartosz Ciupek w okresie od 02.03.2018 do 28.02.2020, był zatrudniony w Instytucie Silników Spalinowych i Napędów na stanowisku starszego referenta-naukowo technicznego do realizacji projektu „Niskoemisyjny kocioł grzewczy na paliwo stałe z możliwością wykorzystania energii odpadowej” realizowanego w ramach programu POIR, poddziałanie 4.1.4 projekty aplikacyjne umowa o dofinansowanie nr POIR.04.01.04-00-0135/16 (05/52/NCBR/7281).

DYREKTOR  
Instytutu Silników Spalinowych i Napędów  
*[Signature]*  
prof. dr hab. inż. Paweł Fuć

Kierownik Projektu  
*[Signature]*  
dr hab. inż. Piotr Lijewski, prof. PP



# Dyplom

dla

## Bartosza Ciupka

za uczestnictwo w finale konkursu  
w Konkursie na Pracę Inżynierską  
na Politechnice Poznańskiej

prof.dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak

Dziekan Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Jan Fic

Członek Zarządu, dyrektor ds. technicznych,  
Veolia Energia Poznań / Veolia Energia Poznań ZEC

Poznań, 6 maja 2016



Odnawiamy zasoby świata

 **VEOLIA**



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI**



# **LIST GRATULACYJNY**

**dla wyróżniającego się nauczyciela akademickiego  
otrzymuje**

**mgr inż. Bartosz Ciupek**

**Dziekan WIŚIE**

*Carolo lury*

prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny

22 stycznia 2021 r.



# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

*prof. dr hab. inż. Teofil Jesionowski*

**Rektor**

Poznań, dnia 6 października 2021 r.

RO-1170/7/21/734

Pan

**mgr inż. Bartosz CIUPEK**

Instytut Energetyki Ciepłej

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

## **Szanowny Panie**

Z przyjemnością informuję, iż przyznaję Panu Nagrodę za osiągnięcia dydaktyczne uzyskane w ubiegłym roku.

Proszę również przyjąć najlepsze życzenia dalszych, licznych sukcesów zawodowych, dobrego zdrowia oraz wszelkiej pomyślności w życiu osobistym.

Z wyrazami uznania





## **POROZUMIENIE O WSPÓŁPRACY**

Dnia 04.07.2018 w Poznaniu zostało zawarte porozumienie o wzajemnej współpracy pomiędzy następującymi stronami:

**TERMOTECHNIKA MICHAŁ KOTELBA**

ul. Postępu 190A Zgorzała, 05-500 Piaseczno

zwanym dalej **TERMOTECHNIKA**

NIP: 716-230-90-85 , REGON: 060301812

reprezentowanym przez:

Jacka Strzeleckiego

a

**Katedra Techniki Ciepłej,**

**Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska**

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

zwana dalej **KATEDRA**

reprezentowana przez Kierownika Katedry:

prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiaka

### **§ 1**

Celami zawartego porozumienia jest:

1. wspólne prowadzenie badań przez pracowników obu stron, oraz innych osób, na warunkach wspólnie uzgodnionych odrębnymi porozumieniami,
2. stałe współdziałanie w zakresie prowadzonych prac projektowych, produkcyjnych oraz badawczych,
3. wzajemne udostępnianie i wykorzystywanie posiadanego zaplecza badawczego i produkcyjnego na bazie posiadanego sprzętu oraz wiedzy w celu realizacji wspólnie podjętych przedsięwzięć uzgodnionych odrębnymi porozumieniami,
4. tworzenie i realizacja wspólnych tematów rozwojowych,
5. wzajemna promocja przy organizacji konferencji, seminariów, szkoleń, prezentacji i wystaw, w tym ich wspólna organizacja, szczególnie w zakresie nowych rozwiązań technicznych oraz wyrobów powstałych w oparciu o innowacyjne technologie,
6. wzajemna promocja i przekazywanie informacji o zakresie działania stron.

## § 2

1. Mając na uwadze powyższe, strony porozumienia oświadczają, że wszelkie prowadzone wspólnie działania nakierowane będą na poprawę efektywności i ekonomiczności procesów spalania w kotłach na paliwa stałe, z uwzględnieniem aspektów wymiany ciepła i sterowania procesami spalania.
2. Strony porozumienia postanawiają organizować i realizować badania zmierzające do szeroko rozumianego rozwoju firmy TERMOTECHNIKA poprzez adaptację oraz tworzenie nowych technologii, zwiększanie oferowanego asortymentu oraz poprawę jego jakości, jak również rozwój zaplecza dydaktycznego KATEDRY poprzez poszerzanie oferty edukacyjnej w oparciu o doświadczenia techniczne i posiadane zaplecze materiałowe stron porozumienia.
3. Ramowy podział zadań i obowiązków, wynikających z niniejszego porozumienia oraz określenie zakresu szczegółowych uzgodnień, zostanie ustalony każdorazowo przed rozpoczęciem realizacji wspólnego przedsięwzięcia.
4. Strony zobowiązują się do należytego zabezpieczenia interesów obu stron wynikających z szeroko rozumianych praw autorskich oraz jawności informacji, jak również promowaniu wspólnych przedsięwzięć.

## § 3

1. Porozumienie wchodzi w życie z dniem podpisania.
2. Zmiany i uzupełnienia do niniejszego Porozumienia mogą być wprowadzane w formie pisemnych aneksów, podpisanych przez Strony Porozumienia.
3. Ze strony KATEDRY ustala się Koordynatorów odpowiedzialnych za współpracę z firmą TERMOTECHNIKA w osobach **dr inż. Rafał Urbaniak, mgr inż. Bartosz Ciupek**.
4. Porozumienie może być wypowiedziane przez każdą ze stron z zachowaniem miesięcznego okresu wypowiedzenia.
5. Porozumienie sporządzono i podpisano w dwóch jednobrzmiących egzemplarzach, każdy na prawach oryginału, z przeznaczeniem po jednym egzemplarzu dla każdej ze stron.

TERMOTECHNIKA

.....  
Jacek Strzelecki

KIEROWNIK  
Katedry Techniki  
Politechniki Puckiej

prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak

.....  
prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**



**WYDZIAŁ MASZYN ROBOCZYCH I TRANSPORTU**

**Katedra Techniki Ciepłej**

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2212, fax +48 61 665 2281

e-mail: office\_cte@put.poznan.pl, www.put.poznan.pl

## **UMOWA UDOSTĘPNIENIA**

Dnia 04.07.2018 w Poznaniu została zawarta umowa pomiędzy następującymi stronami:

**TERMOTECHNIKA MICHAŁ KOTELBA**

ul. Postępu 190A Zgorzała, 05-500 Piaseczno

zwanym dalej **TERMOTECHNIKA**

NIP: 716-230-90-85 , REGON: 060301812

reprezentowanym przez:

Jacka Strzeleckiego

a

**Katedra Techniki Ciepłej,**

**Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska**

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

zwana dalej **KATEDRĄ**

reprezentowana przez Kierownika Katedry:

prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiaka

### **§ 1**

Umowa została zawarta w wyniku podpisania w dniu 04.07.2018 umowy o wzajemnej współpracy pomiędzy KATEDRĄ I TERMOTECHNIKĄ. Na podstawie postanowień umowy o wzajemnej współpracy, a w szczególności w oparciu o § 2 pkt. 2 strony ustaliły, iż „Strony porozumienia postanawiają organizować i realizować badania zmierzające do szeroko rozumianego rozwoju firmy TERMOTECHNIKA poprzez adaptację oraz tworzenie nowych technologii, zwiększanie oferowanego asortymentu oraz poprawę jego jakości, jak również rozwój zaplecza dydaktycznego KATEDRY poprzez poszerzanie oferty edukacyjnej w oparciu o doświadczenia techniczne i posiadane zaplecze materiałowe stron porozumienia.”

### **§ 2**

Firma TERMOTECHNIKA udostępnia KATEDRZE w celach edukacyjnych niżej wskazany przedmiot:

- Kocioł pelletowy wraz z palnikiem ECOMAT 25, zwany dalej „KOCIOŁ”.

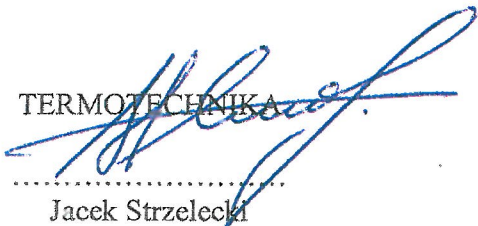
### § 3

1. Firma TERMOTECHNIKA przekazuje KATEDRZE KOCIOŁ, celem wyposażenia Laboratorium Procesów Konwersji Energii (H19/11). Urządzenie ma na celu poszerzenie bazy dydaktycznej KATEDRY.
2. Umowa udostępnienia zostaje zawarta na okres 3 lat, licząc od daty podpisania niniejszej umowy.
3. Po upływie określonego w ust. 2 powyżej terminu, udostępnione elementy zostaną zwrócone firmie TERMOTECHNIKA.
4. Dopuszcza się dalsze przedłużenie okresu udostępnienia. Przedłużenie udostępnienia wymaga podpisania kolejnej umowy, nie później jednak niż jeden miesiąc przed upływem obowiązywania niniejszej Umowy.
5. Udostępnienie odbywa się w sposób nieodpłatny, w wyniku współpracy obu podmiotów.

### § 4

1. Umowa wchodzi w życie z dniem podpisania.
2. Zmiany i uzupełnienia do niniejszej Umowy mogą być wprowadzane w formie pisemnych aneksów, podpisanych przez Strony Umowy.
3. Umowa może być wypowiedziana przez każdą ze stron z zachowaniem miesięcznego okresu wypowiedzenia.
4. Umowę sporządzono i podpisano w dwóch jednobrzmiących egzemplarzach, każdą na prawach oryginału, z przeznaczeniem po jednym egzemplarzu dla każdej ze stron.

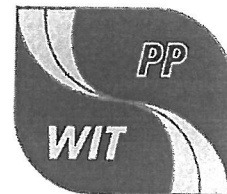
TERMOTECHNIKA



.....  
Jacek Strzelecki

Politechnika Poznańska  
Katedra Techniki Ciepłej

.....  
prof. dr hab. inż. Andrzej Frackowiak



## POROZUMIENIE O WSPÓŁPRACY

Dnia 06.05.2019 roku w Poznaniu zostało zawarte porozumienie o wzajemnej współpracy pomiędzy następującymi stronami:

**LUMO Technika Grzewcza sp. z o.o.**

Krosno, ul Główna 51 B, 62-050 Mosina

zwanym dalej LUMO

NIP: 777-280-84-21 , REGON: 634632019

reprezentowanym przez: Prezesa Zarządu

Krystynę Małecką

a

**Katedra Techniki Ciepłej,**

**Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska**

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

zwana dalej KATEDRA

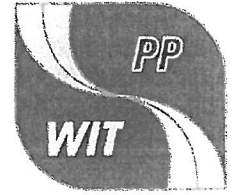
reprezentowana przez: Kierownika Katedry:

prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiaka

### § 1

Celami zawartego porozumienia jest:

1. wspólne prowadzenie badań przez pracowników obu stron, oraz innych osób, na warunkach wspólnie uzgodnionych odrębnymi porozumieniami,
2. stałe współdziałanie w zakresie prowadzonych prac projektowych oraz badawczych,
3. wzajemne udostępnianie i wykorzystywanie posiadanego zaplecza badawczego i produkcyjnego na bazie posiadanego sprzętu oraz wiedzy w celu realizacji wspólnie podjętych przedsięwzięć uzgodnionych odrębnymi porozumieniami,
4. tworzenie i realizacja wspólnych tematów rozwojowych,
5. wzajemna promocja przy organizacji konferencji, seminariów, szkoleń, prezentacji i wystaw, w tym ich wspólna organizacja, szczególnie w zakresie nowych rozwiązań technicznych oraz wyrobów powstałych w oparciu o innowacyjne technologie,
6. wzajemna promocja i przekazywanie informacji o zakresie działania stron.



WYDZIAŁ INŻYNIERII TRANSPORTU

Katedra Techniki Ciepłej

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2212, fax +48 61 665 2281

e-mail: office\_cte@put.poznan.pl, www.put.poznan.pl

§ 2

1. Mając na uwadze powyższe, strony porozumienia oświadczają, że wszelkie prowadzone wspólnie działania nakierowane będą na poprawę efektywności i ekonomiczności procesów spalania w kotłach na paliwa stałe, z uwzględnieniem aspektów wymiany ciepła i sterowania procesami spalania.
2. Strony porozumienia postanawiają organizować i realizować badania zmierzające do szeroko rozumianego rozwoju firmy **LUMO** poprzez adaptację oraz tworzenie nowych technologii, zwiększanie oferowanego asortymentu oraz poprawę jego jakości, jak również rozwój zaplecza dydaktycznego **KATEDRY** poprzez poszerzanie oferty edukacyjnej w oparciu o doświadczenia techniczne i posiadane zaplecze materiałowe stron porozumienia.
3. Ramowy podział zadań i obowiązków, wynikających z niniejszego porozumienia oraz określenie zakresu szczegółowych uzgodnień, zostanie ustalony każdorazowo przed rozpoczęciem realizacji wspólnego przedsięwzięcia.
4. Strony zobowiązują się do należytego zabezpieczenia interesów obu stron wynikających z szeroko rozumianych praw autorskich oraz jawności informacji, jak również promowaniu wspólnych przedsięwzięć.

§ 3

1. Porozumienie wchodzi w życie z dniem podpisania.
2. Zmiany i uzupełnienia do niniejszego Porozumienia mogą być wprowadzane w formie pisemnych aneksów, podpisanych przez Strony Porozumienia.
3. Ze strony **KATEDRY** ustala się Koordynatora odpowiedzialnego za współpracę z firmą **LUMO** w osobie **mgr inż. Bartosza Ciupka**.
4. Porozumienie może być wypowiedziane przez każdą ze stron z zachowaniem miesięcznego okresu wypowiedzenia.
5. Porozumienie sporządzono i podpisano w dwóch jednobrzmiących egzemplarzach, każdy na prawach oryginału, z przeznaczeniem po jednym egzemplarzu dla każdej ze stron.

**LUMO Technika Grzewcza**

PRZEDSIĘZARZĄCA  
.....  
Krystyna Małecka

**Politechnika Poznańska**

KIEROWNIK  
Katedry Techniki Ciepłej

.....  
prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak

prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak

**LUMO Technika Grzewcza Sp. z o.o.**  
ul. Główna 51 B, KROSNO, 62-050 MOSINA  
REGON: 634633019, NIP 777-28-08-421  
tel./fax: 081, 8132-891, 8136-525  
Adres do korespondencji:  
ul. Łazienna 2, 62-050 MOSINA

POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
Katedra Techniki Ciepłej  
ul. Piotrowo 3  
60-965 POZNAŃ  
skrytka pocztowa 5