



Autoreferat

dr inż. Bartosz Ciupek

Nowoczesne metody kontroli i ograniczania emisji substancji szkodliwych w kotłach grzewczych na paliwa stałe

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Energetyki Ciepłej

ul. Piotrowo 3, 60-138 Poznań

Polska

SPIS TREŚCI

1. Imię i Nazwisko	7
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	7
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	7
4. Omówienie osiągnięć	8
4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego.....	8
4.2 Osiągnięcie naukowe złożone z dwóch monografii, cyklu publikacji naukowych oraz praw własności intelektualnej (patentów)	8
4.2.1 Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy	8
4.2.2 Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy	8
4.2.3 Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy	12
4.3 Omówienie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	13
4.3.1 Wstęp	14
4.3.2 Cel naukowy	15
4.3.3 Rozpoznanie podstawowych problemów eksploatacyjnych kotłów grzewczych	16
4.3.4 Ocena wpływu geometrii kanałów powietrznych palników na charakterystyki emisyjne i energetyczne kotłów	18
4.3.5 Analiza możliwości zastosowania recyrkulacji spalin w kotłach grzewczych opalanych biomasą drzewną	23
4.3.6 Opracowanie modeli emisji zanieczyszczeń dla kotłów opalanych biomasą w funkcji tlenu resztkowego w spalinach	27
4.3.7 Badania nad zastosowaniem wodnego roztworu mocznika w kotłach grzewczych	30
4.3.8 Badania nad zastosowaniem reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych w kotłach grzewczych	36
4.3.9 Opracowanie autorskich rozwiązań technicznych dla optymalizacji parametrów cieplnych i emisyjnych kotłów grzewczych	37
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej	39
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	43
7. Inne informacje.....	45

1. Imię i nazwisko.

Bartosz Ciupek

ORCID ID: 0000-0002-1943-6950

Scopus Author ID: 57203339388

Web of Science Researcher ID: AAF-3728-2019

Google Scholar ID: oDExHwkAAAAJ

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe.

2022 – stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna na Politechnice Poznańskiej, Rada Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Analiza możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej.*

Promotor: dr hab. inż. Rafał Urbaniak

2017 – tytuł zawodowy magistra inżyniera na kierunku mechanika i budowa maszyn w specjalności energetyka cieplna, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

Temat pracy: *Badanie wpływu rozdrobnienia paliw węglowych i zawartości wilgoci na emisje NO_x.*

Promotor: dr inż. Rafał Urbaniak

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

01.06.2022 – obecnie Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Instytut Energetyki Ciepłej, Adiunkt.

01.10.2019 – 31.05.2022 Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Instytut Energetyki Ciepłej, Asystent.

02.03.2018 – 01.10.2019 Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Starszy referent naukowo-techniczny.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

„Nowoczesne metody kontroli i ograniczania emisji substancji szkodliwych w kotłach grzewczych na paliwa stałe”

który obejmuje:

- monografia naukowa [1],
- dziewięć artykułów naukowych [2–10],
- trzy patenty [11–13].

4.2. Osiągnięcie naukowe złożone z dwóch monografii, cyklu publikacji naukowych oraz praw własności intelektualnej (patentów).

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi powiązane tematycznie prace publikowane w latach: 2019–2025.

4.2.1. Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy:

- [1] **Ciupek B.** *Kotły grzewcze na paliwa stałe. Wybrane aspekty budowy i eksploatacji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2023, ISBN 978-83-7775-721-5. Punktacja MNISW: **80 pkt.**, (w j. polskim).

4.2.2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy

- [2] **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. Punktacja MNISW: **40 pkt.**, (w j. angielskim).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badawczej, zaprojektowaniu i wykonaniu stanowiska badawczego, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, analizie uzyskanych wyników, opracowaniu wniosków końcowych, redakcji tekstu publikacji oraz zgłoszeniu jej do wydawnictwa.

- [3] 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. Punktacja MNISW: **200 pkt.**; JCI: **1,4**; IF: **7,147**, JIF Quartile: **Q1** (w j. angielskim).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zebraniu danych wejściowych koniecznych do przygotowania warunków brzegowych w modelu (badania eksperymentalne), przygotowaniu stanowiska badawczego oraz archiwizacji danych pomiarowych, zebraniu danych pomiarowych, opracowania wyników badań niezbędnych do przygotowania modelu numerycznego, wsparcie w redakcji tekstu publikacji.

- [4] **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. Punktacja MNISW: **40 pkt.**; JCI: **0,15**; JIF Quartile: **Q4** (w j. angielskim).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki realizacji badań, zaprojektowaniu i budowie stanowiska badawczego, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, analizie uzyskanych wyników, opracowaniu wniosków końcowych oraz wsparciu merytorycznym realizacji wszystkich prac.

- [5] **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. Punktacja MNISW: **70 pkt.**; JCI: **0,08**; IF: **0,49**; JIF Quartile: **Q4** (w j. polskim).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki realizacji badań, zaprojektowaniu i budowie stanowiska badawczego, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, analizie uzyskanych wyników, opracowaniu wniosków końcowych oraz wsparciu merytorycznym realizacji wszystkich prac.

- [6] **Ciupek B.**, Urbaniak R., Kinalska D., Nadolny Z. 2024, *Flue Gas Recirculation System for Biomass Heating Boilers—Research and Technical Applications for Reductions in Nitrogen Oxides (NO_x) Emissions*, Energies, vol.17, no., s.259–1–26, DOI: 10.3390/en17010259. Punktacja MNISW: **140 pkt.**; JCI: **0,46**; IF: **3,2**; JIF Quartile: **Q3** (w j. angielskim).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu założeń teoretycznych oraz ogólnej koncepcji realizacji badań, doborze metod badawczych oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzeniu analizy danych, weryfikacji poprawności zastosowanej metodyki oraz uzyskanych wyników, przeprowadzeniu szczegółowej analizy

formalnej i strukturalnej materiału badawczego, prowadzeniu procesu badawczego, w tym gromadzenia i przetwarzania danych, pozyskiwaniu oraz zarządzaniu zasobami niezbędnymi do realizacji projektu, organizacji, zabezpieczeniu oraz archiwizacji danych badawczych, przygotowaniu oryginalnego manuskryptu, redakcji tekstu oraz jego dostosowania do wymogów wydawniczych i uwag recenzentów, przygotowaniu materiałów graficznych ilustrujących wyniki badań (wykresy, schematy, diagramy), koordynacji działań zespołu badawczego oraz nadzorze merytorycznym nad projektem, organizacji pracy zespołu, harmonogramu prac, zapewnieniu środków na realizację badań.

- [7] **Ciupek B.**, Urbaniak R., Nocoń A. 2024, *Emission Models for Selected Harmful Substances Emitted During Low-Temperature Combustion of Wood Pellets*, Journal of Ecological Engineering, nr 25, T.2 s.267–273, DOI: 10.12911/22998993/177188. Punktacja MNISW: **70 pkt.**; JCI: **0,15**; IF: **1,3**; JIF Quartile: **Q4**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu założeń teoretycznych oraz ogólnej koncepcji badania, doborze metod badawczych oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzenie analizy danych, weryfikacji poprawności zastosowanej metodologii oraz uzyskanych wyników, przeprowadzeniu szczegółowej analizy formalnej i strukturalnej materiału badawczego, prowadzeniu procesu badawczego, w tym gromadzenia i przetwarzania danych, organizacji oraz archiwizacji danych badawczych zgodnie z obowiązującymi standardami, przygotowaniu oryginalnego manuskryptu, redakcji tekstu oraz jego dostosowania do wymogów wydawniczych i uwag recenzentów, przygotowaniu materiałów graficznych ilustrujących wyniki badań (wykresy, schematy, diagramy), koordynacji działań zespołu badawczego oraz nadzoru merytorycznego nad projektem, zapewnieniu środków na realizację badań.

- [8] **Ciupek B.**, Frackowiak A. 2024, *Review of Thermal Calculation Methods for Boilers—Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameters*, Energies, vol.17, no.24, s.6380–1–15, DOI: 10.3390/en17246380. Punktacja MNISW: **140 pkt.**; JCI: **0,46**; IF: **3,2**; JIF Quartile: **Q3**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu założeń teoretycznych oraz ogólnej koncepcji badania, doborze metod badawczych oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzenie analizy danych, weryfikacji poprawności zastosowanej metodologii oraz uzyskanych wyników, przeprowadzeniu szczegółowej analizy formalnej i strukturalnej materiału badawczego, prowadzeniu procesu badawczego, w tym gromadzenia i przetwarzania danych, organizacji oraz archiwizacji danych badawczych zgodnie z obowiązującymi standardami, przygotowaniu oryginalnego manuskryptu, redakcji tekstu oraz jego dostosowania do wymogów wydawniczych i uwag recenzentów, koordynacji działań zespołu badawczego oraz nadzoru merytorycznego nad projektem, zapewnieniu środków na realizację badań.

- [9] **Ciupek B., Nowak-Ocłoń M.** 2025, *Reduction of ammonia emissions from industrial furnace process gases using stationary catalytic systems*, **Energy**, vol.331, DOI: 10.1016/j.energy.2025.137134.

Punktacja MNISW: **200 pkt.**; JCI: **1,59**; IF: **9,4**, JIF Quartile: **Q1**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu założeń teoretycznych oraz ogólnej koncepcji badania, doborze metod badawczych oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzenie analizy danych, weryfikacji poprawności zastosowanej metodologii oraz uzyskanych wyników, przeprowadzeniu szczegółowej analizy formalnej i strukturalnej materiału badawczego, prowadzeniu procesu badawczego, w tym gromadzenia i przetwarzania danych, organizacji oraz archiwizacji danych badawczych zgodnie z obowiązującymi standardami, przygotowaniu oryginalnego manuskryptu, redakcji tekstu oraz jego dostosowania do wymogów wydawniczych i uwag recenzentów, koordynacji działań zespołu badawczego oraz nadzoru merytorycznego nad projektem, zapewnieniu środków na realizację badań.

- [10] **Ciupek B.** 2025, *Emission of nitrogen oxides (NO_x) from a heating boiler fuelled by woody and non-woody biomass pellets supplied with an aqueous solution of urea*, **Biomass and Bioenergy**, vol.202, DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108202.

Punktacja MNISW: **100 pkt.**; JCI: **1,07**; IF: **5,8**, JIF Quartile: **Q1**.

4.2.3. Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy

- [11] **Ciupek B.**, Bartoszewicz J. *Wkład paleniskowy pozycjonujący - napowietrzający złożę paliwa stałego spalanego w palnikach retortowych albo sztokerowych*, Pat.243074, (P.436788), data zgłoszenia: 28.01.2021, data udzielenia prawa: 04.04.2023. Punkty MNISW: **75 pkt.**
- [12] **Ciupek B.** *Układ dozowania wody amoniakalnej dla palników retortowych kotłów nieskotemperaturowych*, Pat.244253, (P.438250), data zgłoszenia: 24.06.2021, data udzielenia prawa: 03.10.2023. Punktacja MNISW: **75 pkt.**
- [13] **Ciupek B.**, Jankowski R. *Układ recyrkulacji spalin dla kotłów grzewczych małej mocy na paliwa stałe*, Pat.243395, (P.438249), data zgłoszenia: 24.06.2021, data udzielenia prawa: 06.06.2023. Punkty MNISW: **75 pkt.**

W Tabeli 1 zamieszczono zestawienie dorobku naukowego wchodzącego w skład osiągnięcia naukowego. Zestawienie ma charakter ilościowy i jakościowy pod względem parametrów naukometrycznych (liczba punktów zgodnie z obowiązującą listą czasopism punktowych według Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz parametr Impact Factor i Impact Factor pięcioletni, tam gdzie mają one zastosowanie.

Tab. 1. Wykaz osiągnięć naukowych wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego.

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba pkt. MNISW
1.	Monografia	1	80
2.	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w JCR (lista MNISW)	9	1000
3.	Patent	3	225
4.	Dorobek łącznie	13	1305
5.	Sumaryczny IF	30,54	
6.	Sumaryczny IF-5	32,54	

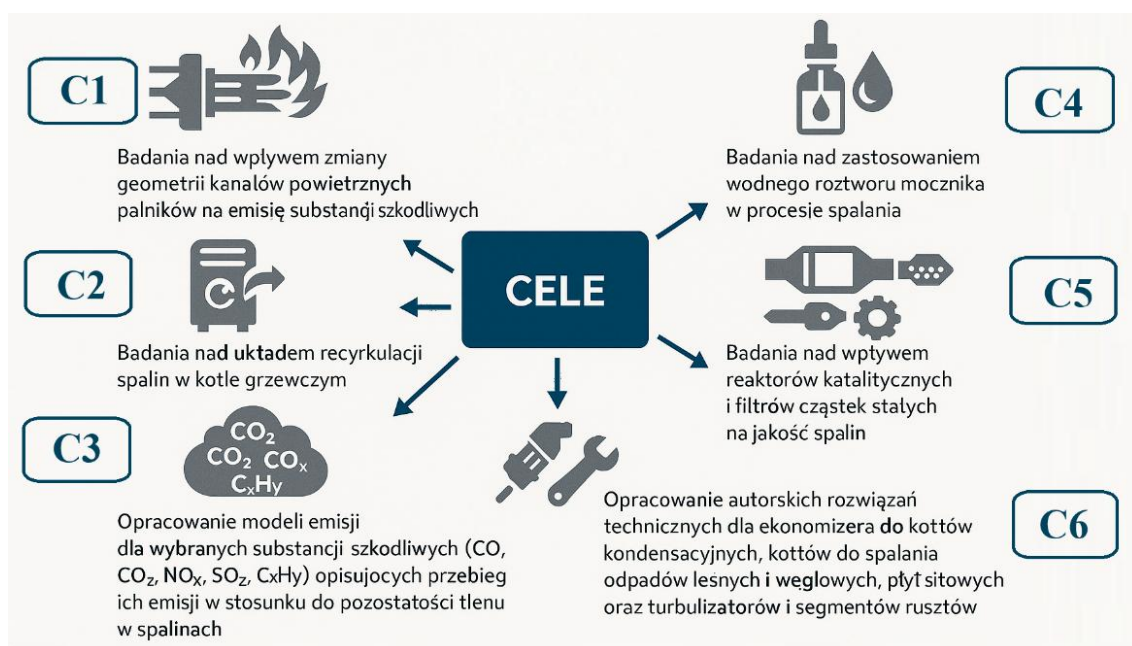
4.3. Omówienie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Rozpoczynając prace badawcze w obszarze technologii energetycznych, skoncentrowałem się na zagadnieniach związanych z modernizacją cieplną i emisyjną kotłów grzewczych na paliwa stałe. Działania te wpisują się w szerszy kontekst poszukiwania rozwiązań ograniczających negatywny wpływ energetyki rozproszonej na środowisko. Moje badania miały na celu poprawę efektywności energetycznej urządzeń grzewczych przy jednoczesnym ograniczeniu emisji zanieczyszczeń do atmosfery, w tym pyłów oraz związków azotu i węgla.

Zakres realizowanych prac obejmował przegląd aktualnego stanu wiedzy oraz identyfikację kierunków rozwoju nowoczesnych technologii stosowanych w kotłach małej i średniej mocy. Na tej podstawie opracowałem koncepcje rozwiązań technicznych oraz technologicznych, które następnie zostały poddane ocenie w ramach eksperymentów laboratoryjnych i stanowiskowych. Prowadzone badania obejmowały m.in. pomiary parametrów spalania, bilansowania cieplnego oraz emisji zanieczyszczeń w różnych warunkach eksploatacyjnych. Otrzymane wyniki posłużyły do walidacji zaprojektowanych rozwiązań oraz określenia ich potencjału wdrożeniowego.

Efektom prac było nie tylko potwierdzenie skuteczności proponowanych rozwiązań w warunkach eksperymentalnych, lecz także przygotowanie dokumentacji umożliwiającej objęcie wyników ochroną własności intelektualnej. Część opracowanych koncepcji została wdrożona w praktyce przemysłowej, co potwierdza aplikacyjny wymiar realizowanych badań. Całość rezultatów została przedstawiona w formie graficznej na Ryc. 1, gdzie wyróżniono poszczególne cele (C1–C6) przypisane kolejnym etapom pracy badawczej oraz wyniki końcowe w postaci rozwiązań rekomendowanych do zastosowania w nowoczesnych instalacjach grzewczych.

Warto zauważyć, że przedstawione prace badawcze nie powielają się z badaniami i pracami zrealizowanymi w ramach pracy doktorskiej (pkt 2 autoreferatu), a większość prac powstała po osiągnięciu stopnia doktora nauk.



Ryc. 1. Zakres prac w ramach osiągnięcia naukowego z zaznaczonymi celami badawczymi.

4.3.1. Wstęp

Kotły grzewcze na paliwa stałe są jednym z podstawowych źródeł ciepła w krajowym miksie wykorzystywanym do ogrzewania (na cele bytowe i quasi przemysłowe). Według danych Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego z 2023 r. w Polsce zainstalowanych jest 17 299 321 domowych źródeł ciepła z czego łącznie 40,37 % zainstalowanych urządzeń spala paliwa stałe (do urządzeń należą: kotły z automatycznym i ręcznym podawaniem paliwa, kominki, kozy grzewcze, ogrzewacze powietrza i piece kaflowe). Oznacza to, że kotły grzewcze na paliwa stałe i urządzenia im towarzyszące są znaczącą grupą urządzeń cieplnych wykorzystywaną na terenie całego kraju, co powoduje i uzasadnia cel i zakres realizowanych badań jako ważnych społecznie.

Według danych CEEB (Centralna Ewidencja Emisyjności Budynków) kotły na paliwa stałe, są głównym źródłem zanieczyszczeń powietrza w Polsce. Są odpowiedzialne za znaczną część emisji pyłu $\text{PM}_{2.5}$ oraz rakotwórczego benzo(a)pirenu. Ogrzewanie domów za pomocą węgla i innych paliw stałych w nieefektywnych urządzeniach jest jednym z głównych powodów pogorszenia jakości powietrza, zwłaszcza w sezonie grzewczym. Emisja z kotłów na paliwa stałe stanowi około 50% całej emisji pyłu zawieszonego w Polsce w tym 52% pyłu $\text{PM}_{2.5}$ i 91% rakotwórczego benzo(a)pirenu.

4.3.2. Cel naukowy

Tematyka kotłów grzewczych opalanych paliwami stałymi stanowi kontynuację badań naukowych zapoczątkowanych w ramach rozprawy doktorskiej. W oparciu o zgromadzony dorobek naukowy, przeprowadzono szereg nowych badań obejmujących dotychczas niezbadane obszary. Wskazano również nowe kierunki rozwoju oraz opracowano autorskie rozwiązania techniczne i technologiczne, ukierunkowane na poprawę efektywności cieplnej i ograniczenie emisji zanieczyszczeń w tego typu urządzeniach. Część opracowanych rozwiązań została skutecznie wdrożona w praktyce przemysłowej.

Dodatkowym obszarem badawczym, rozwijanym po uzyskaniu stopnia doktora, były zagadnienia związane z optymalizacją procesów cieplnych i emisyjnych w silnikach lotniczych, głównie turboodrzutowych. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 3 („Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze...”) oraz szczegółowo opisano w załączniku nr 4 („Wykaz osiągnięć naukowych...”, pkt II – „Wykaz aktywności naukowej”).

Zarówno główny nurt badawczy, dotyczący kotłów grzewczych, jak i tematyka badań pobocznych wpisują się w obszar nauk inżynierijno-technicznych, w szczególności w dyscyplinę: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Prowadzone prace badawcze nad optymalizacją cieplną i emisyjną kotłów grzewczych obejmowały kompleksowe działania badawczo-rozwojowe, w tym:

- przegląd stanu wiedzy w zakresie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych stosowanych w kotłach,
- opracowanie koncepcji technologicznych oraz rozwiązań technicznych znajdujących zastosowanie w analizowanej tematyce,
- prowadzenie eksperymentów laboratoryjnych i półtechnicznych,
- walidację opracowanych rozwiązań,
- przygotowanie dokumentacji formalnej na potrzeby ochrony własności intelektualnej.

Wyniki części tych prac zostały zaimplementowane w praktyce przemysłowej, co potwierdza ich potencjał aplikacyjny.

Główny nurt badawczy skoncentrowany na optymalizacji kotłów grzewczych realizowany był poprzez osiąganie kolejnych, jasno zdefiniowanych celów naukowych. W ich ramach prowadzono szczegółowe badania eksperymentalne, stanowiące podstawę do opracowania nowatorskich rozwiązań inżynierskich, mogących znaleźć praktyczne zastosowanie w sektorze energetyki cieplnej. Realizacja tych prac podzielona jest na główne cele badawcze do których zalicza się:

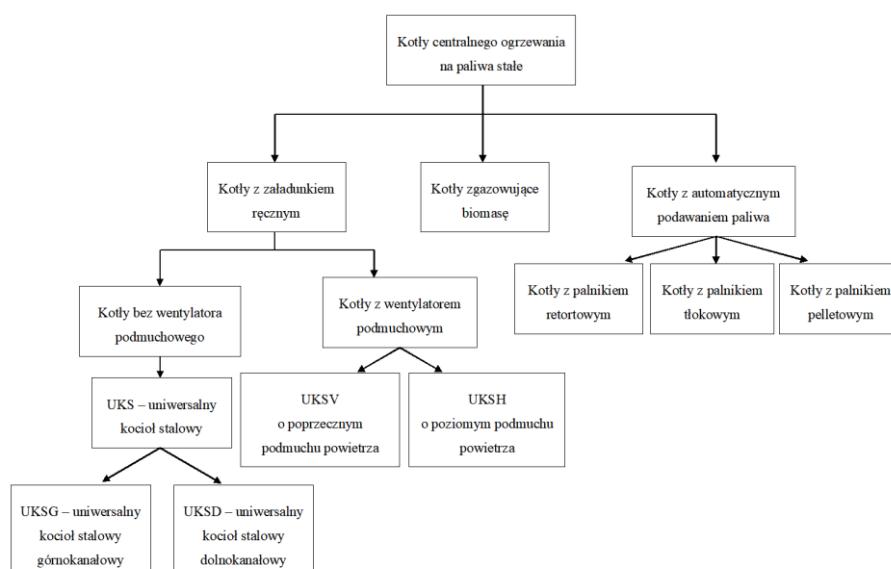
- C1. badania nad wpływem zmiany geometrii kanałów powietrznych palników na emisję substancji szkodliwych, którego efektem są: autorskie rozwiązania konstrukcyjne wkładu paleniskowego (Pat.2430740), wkładu turbulizacyjnego (P.445436) oraz turbulizatora spalin (W.131902). Wybrane wyniki badań i analiz prezentowane były również w trzech publikacjach naukowych [1, 11].
- C2. badania nad układem recyrkulacji spalin, efektem zrealizowanych prac koncepcyjnych oraz późniejszej weryfikacji w trakcie badań eksperymentalnych i walidacyjnych zasadności recyrkulacji spalin kotła grzewczego na pellet drzewny było przygotowanie patentu dla tego zakresu (Pat.243395) [6, 13].
- C3. opracowanie modeli emisji dla wybranych substancji szkodliwych (CO , CO_2 , NO_x , SO_2 i C_xH_y) opisujących przebieg ich emisji w stosunku do pozostałości tlenu w spalinach [1, 4, 7].
- C4. badania nad zastosowaniem wodnego roztworu mocznika jako reagenta reakcji spalania, efektem zrealizowanych prac badawczych było opracowanie koncepcyjnej technologii wtrysku czynnika dla palników stosowanych w kotłach grzewczych na paliwa stałe, która jest chroniona prawem patentowym (Pat.244253) [10, 12].
- C5. badania nad wpływem reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych na jakość spalin. Otrzymane wyniki badań oraz płynące z nich wnioski pozwoliły na dalsze rozwijanie zagadnienia badawczego rozszerzając go o piece przemysłowe od obróbki cieplno-chemicznej, które charakteryzują się znaczącymi emisjami gazów po procesowych ale nie posiadają w swojej pierwotnej budowie instalacji je redukujących. Pozytywne przesłanki pozwoliły na realizację stażu naukowego w 2025 r. na Politechnice Krakowskiej w ramach których rozwijane było dalej to zagadnienie badawcze (szczegóły w załączniku nr 4) [2, 5, 9].
- C6. opracowanie autorskich rozwiązań technicznych (dokumentacja techniczna, technologiczna, wytyczne), dla rozwiązań: ekonomizera do kotłów kondensacyjnych, kotłów do spalania odpadów leśnych i węglowych, płyt sitowych oraz turbulizatorów i segmentów rusztów [3, 8].

4.3.3. Rozpoznanie podstawowych problemów eksploatacyjnych kotłów grzewczych

W publikacji [1] przedstawione są wybrane zagadnienia związane z budową i eksploatacją kotłów grzewczych na paliwa stałe. W ramach tej pracy dokonałem usystematyzowania skomplikowanego podziału kotłów grzewczych ze względu na budowę i działanie kotła, co

wcześniej stanowiło zagadnienie różnie interpretowane przez badaczy oraz środowisko przemysłowe, zwłaszcza w momencie pojawienia się rozbudowanej grupy kotłów z automatycznym podawaniem paliwa (Ryc. 2). Silną stroną tej publikacji są szczegółowe opisy budowy i eksploatacji poszczególnych rodzajów kotłów oraz przygotowany i usystematyzowany rozdział dotyczący obliczeń termodynamicznych kotłów. W mojej opinii najcenniejszym elementem tej pracy jest przygotowanie pełnego projektu (obliczenia cieplne) kotła płomienicowo-płomieniówkowego. Z dotychczas spotykanych w literaturze pozycji książkowych trudno było znaleźć całościowy projekt obliczeniowy dla kotła płomienicowo-płomieniówkowego (aktualnie najpopularniejsza forma kotła spotykana na rynku), co przysparzało naukowcom i producentom kotłów duże problemy z weryfikacją parametrów cieplnych jakimi charakteryzują się aktualnie produkowane kotły grzewcze.

Dlatego stworzenie usystematyzowanego i replikowalnego schematu obliczeniowego, gotowego do wykorzystania w pracy naukowej i przemysłowej, w mojej opinii stanowi znaczący wkład w podniesienie wiedzy z zakresu optymalizacji cieplnej kotłów na paliwa stałe. Opracowanie tej metodyki obliczeń oraz gruntowna jej analiza [8] pozwoliły wskazać dalsze kierunki prac nad optymalizacją cieplną kotłów ale z uwzględnieniem aspektów ekologicznych, które dotychczas nie były brane pod uwagę. Warto zauważyć że pozycja [8] otrzymała wyróżnienie *Feature papers* reprezentując najbardziej zaawansowane badania o znacznym potencjale wpływu na dziedzinę (szczegóły w zał. 4).



Ryc. 2. Podział kotłów grzewczych na paliwa stałe [oprac. własne].

4.3.4. Ocena wpływu geometrii kanałów powietrznych palników na charakterystyki emisyjne i energetyczne kotłów

W ramach realizacji celu badawczego C1, skoncentrowano się na analizie wpływu geometrii kanałów powietrznych palników retortowych na efektywność cieplną procesu spalania oraz emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Główne działania badawcze obejmowały zarówno opracowanie dedykowanych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i ich weryfikację w warunkach eksperymentalnych.

W pierwszym etapie przeprowadzono serię badań emisyjno-energetycznych wybranych modeli palników retortowych (Pancerpol PPS STANDARD I i II generacji), powszechnie stosowanych w Polsce w indywidualnych źródłach ciepła opalanych paliwami stałymi. Pomiarom poddano parametry emisji zanieczyszczeń (PM, CO, NO_x) oraz parametry cieplne (temperatura spalin, moc cieplna, sprawność kotła, straty ciepła do otoczenia). Wyniki zbiorcze otrzymane z wstępnych badań zaprezentowano w Tab. 2.

Tab. 2. Wyniki z badań wstępnych dla wybranych modeli palników retortowych [oprac. własne].

Parametr	Rodzaj węgla (paliwa)			
	brunatny		kamienny	
	moc kotła			
	nominalna	minimalna	nominalna	minimalna
Temperatura spalin [°C]	207,0	142,0	257,1	160,3
Zawartość O ₂ [%]	11,40	17,40	9,50	16,70
Zawartość CO ₂ [%]	9,40	3,30	11,40	4,20
Ciąg spalin [Pa]	26,00	28,00	19,00	23,00
Zawartość CO [mg/m ³]	838,0	2689	162,0	4261
Zawartość NO _x [mg/m ³]	384,0	480,0	431,0	500,0
Zawartość PM [mg/m ³]	199,0	165,0	147,0	846,0

Z uśrednienia otrzymanych wyników zaprezentowanych w tabeli powyżej wynika, że proces spalania węgla brunatnego i kamiennego dla obu konfiguracji pracy palnika (moc nominalna i minimalna) w sporym zakresie się pokrywa. Główną anomalią zaobserwowaną w trakcie badań jest silny wzrost emisji PM dla mocy minimalnej przy spalania węgla kamiennego. Główną przyczyną tego stanu może być silne wypalenie paliwa w złożu palnika poniżej strefy kanałów napowietrzających oraz wynikające z tego wzbicie popiołów z strefy spalania przez odsłonięte kanały powietrzne. W przypadku pracy palnika z mocą nominalną gdy kanały powietrzne są w pełni zakryte problem ten nie funkcjonuje (zbliżona emisja zarówno dla węgla brunatnego jak i kamiennego), dopiero po pojawieniu się tej anomalii w przypadku węgla kamiennego obserwowany jest silny wzrost emitowanego pyłu. W przypadku węgla brunatnego zjawisko to nie jest obserwowane gdyż paliwo to ma mniejszą kaloryczność i sterownik kotła, starając się utrzymać równą moc kotła, dokonuje częstszych faz podawania paliwa, a to prze-

kłada się na mniejsze amplitudy bądź brak pojawienia się faz odkrycia kanałów napowietrzających odmiennie jak dla spalania węgla kamiennego. Analogicznie do problemów związanych z emisją PM dla pracy kotła z mocą minimalną podobne problemy obserwowane są dla emisji CO. Obserwowany jest też nieznaczny wzrost emisji NO_x po stronie spalania węgla brunatnego, którego kaloryczność jest wyższa względem węgla brunatnego. W tym przypadku sądzić można, że w procesie spalania w stopniu niewielkim udział ma również proces termiczny i szybki powstawania tlenków azotu, bądź węgiel kamienny użyty w badaniach charakteryzował się wyższym udziałem azotu paliwowego.

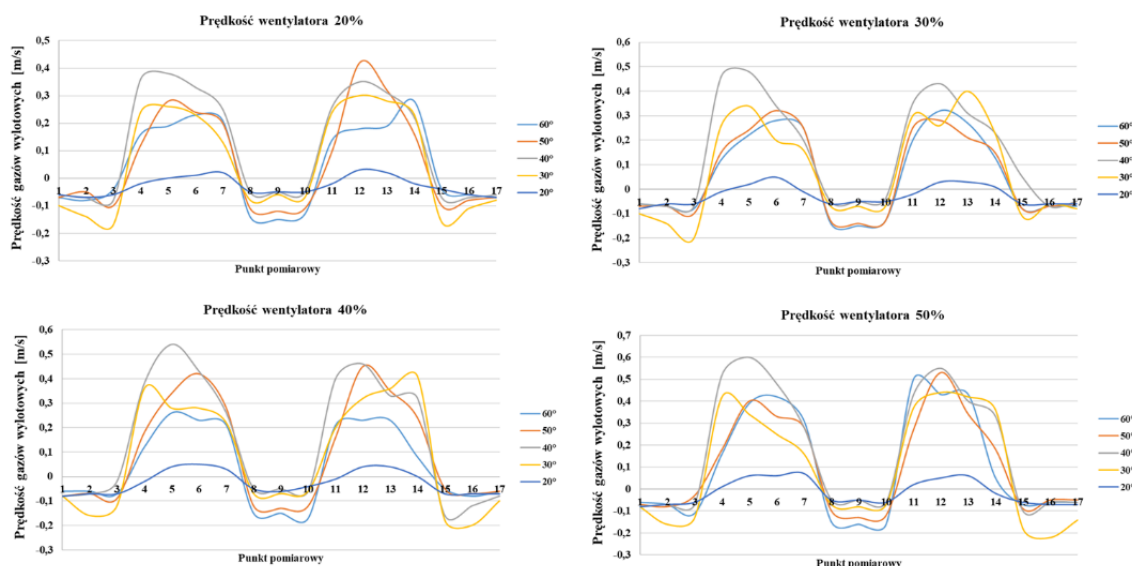
W celu dokładnej analizy przepływu powietrza i jego oddziaływania na strefy spalania, opracowano autorski system pozycjonowania kanałów powietrznych, umożliwiający zmianę ustawień geometrycznych w czasie rzeczywistym (Ryc. 3). Kluczowym elementem systemu był pierścień powietrzny zintegrowany z nakładką pozycyjną kanałów, co pozwoliło na pomiar rozkładu ciśnienia dynamicznego i statycznego w obrębie poszczególnych stref napowietrzania. Badania umożliwiły identyfikację stref stagnacji, obszarów zawirowań oraz wewnętrznej recyrkulacji powietrza w obrębie złoża paliwa.



Ryc. 3. System pozycjonowania kanałów napowietrzających palników retortowych.

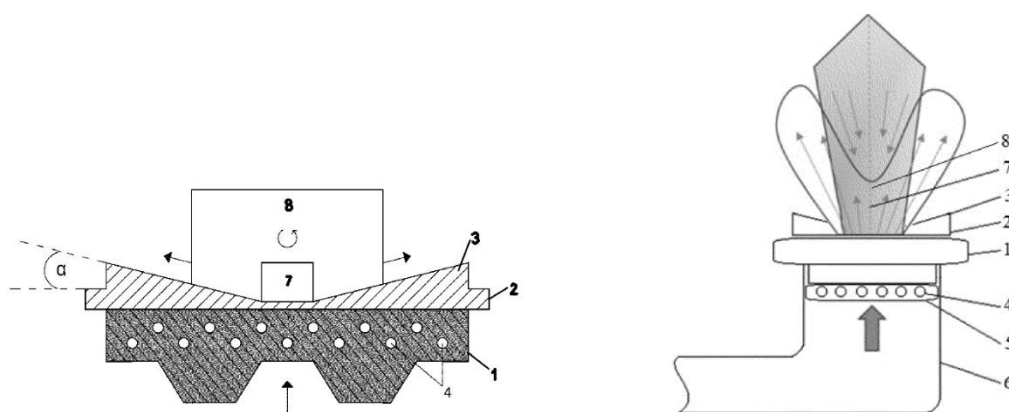
a) pierścień napowietrzający, b) nakładka pozycyjna kanałów [oprac. własne].

Wektory prędkości powietrza oraz kąty wypływu pozwoliły na określenie konfiguracji, która umożliwia zawrócenie strugi spalin do centrum płomienia (Ryc. 4). Efekt ten, związany z intensyfikacją dopalania sadzy i tlenku węgla, przełożył się na wyraźną redukcję emisji tych związków oraz wzrost sprawności spalania.



Ryc. 4. Rozkład powietrza dla pomiarów z zastosowaną nakładką kierowniczą przy zmianie kąta wypływu powietrza i prędkości obrotowej wentylatora podmuchowego [oprac. własne].

W kolejnym etapie opracowano uniwersalną metodę optymalizacji geometrii wieńca powietrznego, możliwą do zastosowania niezależnie od mocy i konstrukcji palnika retortowego. Rezultatem prac było opracowanie autorskiego urządzenia inżynierskiego, umożliwiającego regulację ustawień palnika w sposób dostosowany do jego charakterystyki pracy, z uwzględnieniem celów środowiskowych i energetycznych (Ryc. 5).



Ryc. 5. Autorskie rozwiązanie optymalizacji kąta nachylenia kanałów napowietrzających wieńca powietrznego palnika retortowego [oprac. własne].

Objaśnienia: 1 – wieniec powietrzny, 2 – nakładka kierownicza, 3 – łopatki kierownicze, 4 – otwory napowietrzające, 5 – gniazdo wieńca powietrznego, 6 – retorta, 7 – centralna strefa spalania paliwa i żaru, 8 – obszar recyrkulacji wewnętrznej palnika.

Po przeprowadzeniu optymalizacji, dokonano ponownej oceny emisji zanieczyszczeń na stanowisku badawczym (Ryc. 6) wyposażonym w kocioł Q-Eko 15, wykazując znaczne obniżenie stężenia CO oraz pyłu zawieszonego w spalinach, przy jednoczesnym wzroście sprawności cieplnej urządzenia.



Ryc. 6. Widok stanowiska badawczego [oprac. własne].

Uzyskane wyniki umożliwiły identyfikację optymalnych zakresów ustawień geometrycznych kanałów powietrznych oraz określenie ich granic stosowalności. Przeprowadzono badania nad zoptymalizowanymi wieńcami napowietrzającymi. Otrzymane wyniki z badań pokazano w Tabeli 3.

Tab. 3. Porównanie wyników badań pierwotnej konfiguracji palników retortowych oraz palników z zoptymalizowanym wieńcem napowietrzającym [oprac. własne].

Parametr	Rodzaj węgla (paliwa)							
	brunatny				kamienny			
	moc kotła							
	nominalna		minimalna		nominalna		minimalna	
Rodzaj wieńca pow.	stary	nowy	stary	nowy	stary	nowy	stary	nowy
Temperatura spalin [°C]	207,0	234,0	142,0	131,0	257,1	230,0	160,3	153,0
Zawartość O ₂ [%]	11,40	12,60	17,40	14,00	9,50	7,00	16,70	13,80
Zawartość CO ₂ [%]	9,40	8,20	3,30	5,90	11,4	13,90	4,20	7,10
Ciąg spalin [Pa]	26,00	16,00	28,00	36,00	19,00	16,00	23,00	26,00
Zawartość CO [mg/m ³]	838,0	1041	2689	864,0	162,0	92,00	4261	946,0
Zawartość NO _x [mg/m ³]	384,0	370,0	480,0	371,0	431,0	305,0	500,0	343,0
Zawartość PM [mg/m ³]	199,0	47,00	165,0	64,0	147,0	47,0	846,0	102,0

Analizując wyniki zaprezentowane w Tabeli 3 widać że, zaproponowana technologia spalania węgla, zarówno brunatnego, jak i kamiennego, przynosi istotne korzyści w zakresie efektywności energetycznej oraz redukcji emisji zanieczyszczeń. Dla węgla brunatnego zastosowanie nowego wieńca powoduje wyraźny wzrost temperatury spalin przy nominalnej mocy kotła (234°C w porównaniu do 207°C) oraz spadek przy minimalnej mocy (142°C do 131°C), co sugeruje poprawę wymiany ciepła. W przypadku węgla kamiennego odnotowano odwrotną

tendencję, nieznaczne obniżenie temperatury spalin w nowej konfiguracji, co może wynikać z bardziej efektywnego chłodzenia. Zawartość tlenu (O_2) w spalinach wzrasta w przypadku zmodyfikowanego palnika, podczas gdy zawartość dwutlenku węgla (CO_2) maleje, co świadczy o lepszej organizacji procesu spalania i większej efektywności jego spalania.

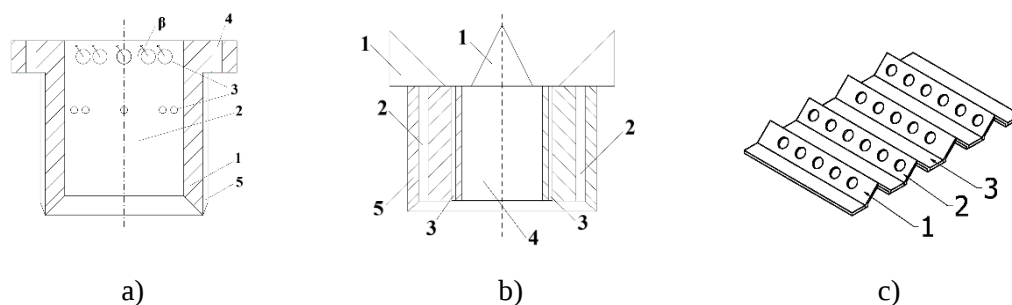
Najbardziej istotne zmiany dotyczą emisji zanieczyszczeń. Nowa konfiguracja palnika znacząco redukuje emisję tlenku węgla (CO), szczególnie dla węgla brunatnego przy minimalnej mocy kotła (2689 mg/m^3 do 864 mg/m^3), co wskazuje na bardziej efektywne utlenianie w procesie spalania. Podobnie redukcja emisji tlenków azotu (NO_x) jest widoczna dla obu rodzajów węgla, szczególnie przy minimalnej mocy kotła, gdzie wartości dla węgla brunatnego spadają z 480 mg/m^3 do 370 mg/m^3 , a dla węgla kamiennego z 500 mg/m^3 do 343 mg/m^3 . Jeszcze bardziej istotna jest redukcja emisji cząstek stałych (PM), które dla węgla brunatnego przy nominalnej mocy maleją z 199 mg/m^3 do 47 mg/m^3 , a dla węgla kamiennego przy minimalnej mocy z 846 mg/m^3 do 102 mg/m^3 .

Ciąg spalin w nowej technologii wzrasta, co może poprawiać transport spalin i ograniczać osadzanie cząstek stałych w systemie kominowym. Wyniki wskazują, że modyfikacja palnika przynosi największe korzyści w przypadku węgla kamiennego, który charakteryzuje się lepszymi właściwościami spalania w porównaniu do węgla brunatnego, który nie powinien być zalecany do spalania w tego typu urządzeniach grzewczych. Redukcja emisji PM i NO_x , czyni nową technologię bardziej przyjazną środowisku i wskazuje na jej potencjał w zmniejszaniu negatywnego wpływu spalania paliw stałych na jakość powietrza.

Podsumowując, modernizacja technologii spalania umożliwia znaczną redukcję emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz poprawia kontrolę procesów spalania, co stanowi kluczowy krok w kierunku spełnienia norm środowiskowych i poprawy efektywności energetycznej systemów grzewczych. Rekomenduje się kontynuację badań nad optymalizacją konstrukcji palników oraz długoterminowym wpływem ich zastosowania na systemy energetyczne.

Efektom przeprowadzonych badań było opracowanie trzech zgłoszeń patentowych, obejmujących: wkład palnikowy, jego wersję z elementami turbulizującymi oraz turbulizator spalin (Ryc. 7). Technologia została zwalidowana na stanowisku badawczym, co potwierdziło jej praktyczne zastosowanie.

Zwieńczeniem prowadzonych prac było wskazanie dalszych kierunków badań w zakresie modyfikacji konstrukcji palników jako kluczowego elementu umożliwiającego redukcję emisji zanieczyszczeń i poprawę efektywności energetycznej kotłów na paliwa stałe.



Ryc. 7. Rozwiązania przemysłowe (patenty) opracowane w ramach badań.

a) wkład palnikowy, b) turbulizacyjny wkład palnikowy, c) turbulizator spalin [oprac. własne].

4.3.5. Analiza możliwości zastosowania recyrkulacji spalin w kotłach grzewczych opalanych biomasą drzewną

W ramach realizacji celu badawczego C2 przeprowadzono kompleksowe prace obejmujące ocenę potencjału technologii recyrkulacji spalin (EGR ang. *Exhaust Gas Recirculation*) w kontekście jej zastosowania w kotłach grzewczych opalanych biomasą drzewną, w szczególności pelletem.

Pierwszym etapem prac była dogłębna analiza literaturowa obejmująca przegląd aktualnego stanu wiedzy i luki poznawczej dotyczącej zastosowania techniki EGR w domowych źródłach ciepła na paliwa stałe. W toku badań stwierdzono, że chociaż technologia recyrkulacji spalin znajduje szerokie zastosowanie w systemach przemysłowych, energetyce zawodowej, a także w układach napędowych pojazdów (głównie silnikach spalinowych), jej zastosowanie w kotłach grzewczych opalanych biomasą pozostaje ograniczone. W szczególności brak było doniesień o rozwiązaniach wdrożonych w kotłach grzewczych na pellety drzewne. Zidentyfikowane prace naukowe dotyczyły w większości aspektów koncepcyjnych oraz badań wstępnych, głównie dla biomasy pochodzenia rolniczego.

Kolejny etap obejmował przeprowadzenie badań eksperymentalnych w skali rzeczywistej, z wykorzystaniem kotła grzewczego opalanego pelletem drzewnym, wyposażonego w automatyczny system podawania paliwa. Pomiary zrealizowano w dwóch punktach pracy kotła, przy 30% oraz 100% mocy znamionowej (zgodnie z normą PN-EN 303-5:2012), a wartości współczynnika recyrkulacji ustalono kolejno na poziomach: 10%, 20% i 30% zgodnie z równaniem (1).

$$r = \frac{\dot{V}_{\text{ret}}}{\dot{V}_{\text{tot}} - \dot{V}_{\text{ret}}} \quad (1)$$

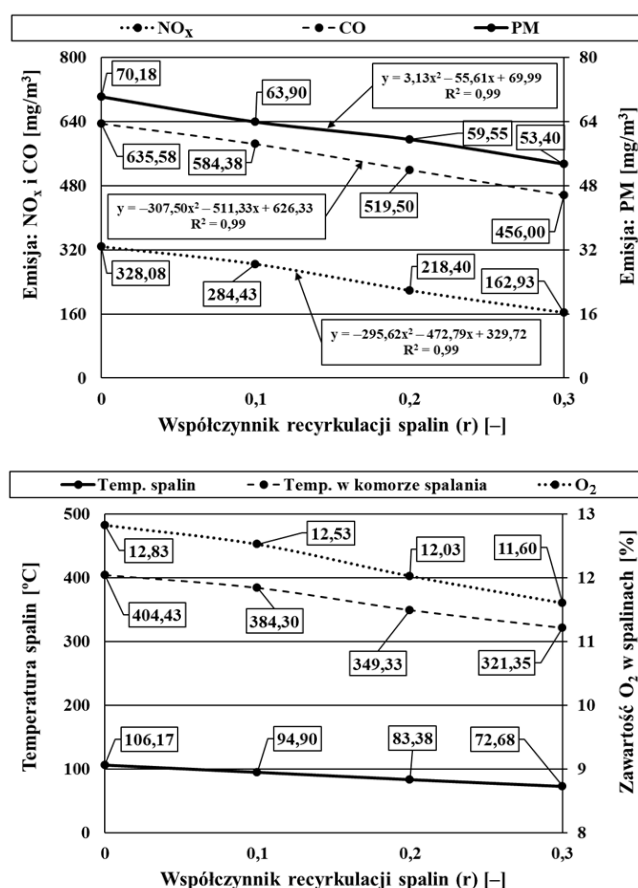
gdzie: r – współczynnik recyrkulacji spalin [–], $\dot{V}_{\text{ret}}$ – strumień spalin nawracany do procesu spalania [m^3/h], $\dot{V}_{\text{tot}}$ – całkowity strumień spalin generowany w trakcie procesu spalania [m^3/h].

Przeprowadzone badania opierały się na szesnastu etapach pomiarowych wynikających z zaplanowanego toru pomiarowego mającego na celu pełne zobrazowanie emisji substancji szkodliwych wynikających z zastosowania bądź nie stosowania recyrkulacji spalin. W czasie badań zmierzono emisję z niskotemperaturowego wodnego kotła grzewczego (model BIOVERT 21), pracującego przy mocy około 21 kW i dla około 6,3 kW mocy, co odpowiada punktom pracy równym 100% i 30% mocy znamionowej. W czasie badań kocioł zasilany był w sposób automatyczny pelletem z drewna sosnowego i bukowego. Badania zrealizowano bez recyrkulacji spalin ($r = 0,0$) oraz ze współczynnikami recyrkulacji $r = 0,1$, $r = 0,2$ i $r = 0,3$. Każdy z etapów trwał około 6 godzin i został podzielony na 30-minutowe podetapy, dla których obliczono uśrednione wartości parametrów spalania kotła. Dla tych trzydziestominutowych podetapów, traktowanych jako oddzielne pomiary, obliczono wartości średnie, dla których poziomy niepewności obliczono z 95% poziomem ufności. Program badań przedstawiono w Tabeli 4.

Tab. 4. Plan zrealizowanych badań [oprac. własne].

Etap badań	Moc kotła	Rodzaj paliwa (pelletu)	Stopień recyrkulacji spalin „r”	
1.	21,0 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,0$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 0,00 \text{ [m}^3/\text{h]}$
2.		drewno bukowe		
3.	6,3 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,0$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 0,00 \text{ [m}^3/\text{h]}$
4.		drewno bukowe		
5.	21,0 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,1$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,95 \text{ [m}^3/\text{h]}$
6.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,95 \text{ [m}^3/\text{h]}$
7.	6,3 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,1$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 0,75 \text{ [m}^3/\text{h]}$
8.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 0,75 \text{ [m}^3/\text{h]}$
9.	21,0 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,2$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 3,58 \text{ [m}^3/\text{h]}$
10.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 3,58 \text{ [m}^3/\text{h]}$
11.	6,3 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,2$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,37 \text{ [m}^3/\text{h]}$
12.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,37 \text{ [m}^3/\text{h]}$
13.	21,0 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,3$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 4,96 \text{ [m}^3/\text{h]}$
14.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 4,96 \text{ [m}^3/\text{h]}$
15.	6,3 [kW]	drewno sosnowe	$r = 0,3$	$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,89 \text{ [m}^3/\text{h]}$
16.		drewno bukowe		$\dot{V}_{\text{ret}} = 1,89 \text{ [m}^3/\text{h]}$

Kluczowym efektem tego etapu badań było określenie wpływu recyrkulacji na emisję zanieczyszczeń: tlenków azotu (NO_x), tlenku węgla (CO) oraz pyłu zawieszonego (PM). Wyniki przedstawiono na Ryc. 8 jako funkcję stopnia recyrkulacji.



Ryc. 8. Uśrednione dla danego współczynnika recyrkulacji (r) emisje: NO_x, CO i PM oraz temperatura spalin, temperatura wewnątrz komory spalania i stężenie O₂ [oprac. własne].

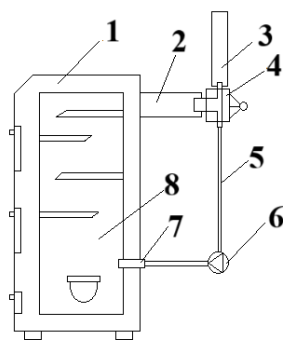
Syntetyzując obserwacje i wnioski z przeprowadzonych badań zaobserwowano następujące prawidłowości:

- temperatura, do której ogrzewane są recyrkulowane gazy spalinowe, powinna być wyższa niż temperatura początkowa gazów spalinowych, aby zapobiec powstawaniu termicznych tlenków azotu, głównie w przypadku pojawienia się temperatury ($T_f < 1500$ K),
- należy przeprowadzić recyrkulację gazów spalinowych w temperaturach do 1073 K, aby zapobiec lokalnemu stężeniu tlenu w obszarze spalania w wysokiej temperaturze. W opracowanym rozwiązaniu, gdy zwiększa się współczynnik recyrkulacji „r”, zmniejsza się emisja NO_x, PM i CO, a jednocześnie obserwuje się spadek zarówno temperatury spalin, jak i temperatury w komorze spalania. W rozważanym rozwiązaniu pojawienie się termicznych i natychmiastowych tlenków azotu nie jest widoczne, ze względu na zastosowanie precyzyjnej regulacji szybkości recyrkulacji w oparciu o zawartość tlenu w spalinach i ich temperaturę,

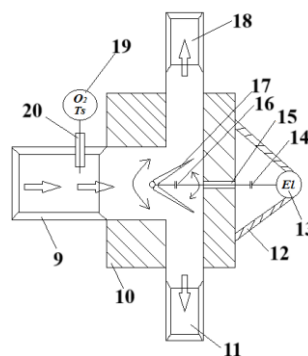
- głównym problemem w przypadku systemów recyrkulacji spalin stosowanych w rozwiązaniach przemysłowych jest występowanie nadmiernej emisji CO i PM podczas radykalnej recyrkulacji spalin. W przypadku spalania wysokotemperaturowego i bezpłomieniowego, niskie emisje NO_x i CO obserwuje się tylko w przypadku paliw gazowych. W przypadku paliw stałych, do których zalicza się biomasa, w przypadku spalania niskotemperaturowego, typowego dla kotłów grzewczych, spalanie bezpłomieniowe jest niemożliwe, dlatego na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można przyjąć, że dla tej grupy urządzeń właściwym krokiem do dalszych badań i wdrożeń przemysłowych jest regulowany układ recyrkulacji spalin, realizowany przez system zaworów z pełną automatyką sterującą,
- szczególną uwagę należy zwrócić na współczynniki recyrkulacji spalin większe niż $r = 0,3$ w przypadku niskotemperaturowego spalania biomasy w kotłach grzewczych, ze względu na bliskość temperatury punktu rosy spalin i możliwość kondensacji wilgoci w kanałach recyrkulacyjnych systemu. Problem ten może mieć odwrotny skutek od zamierzonego i objawiać się znaczną emisją tlenku węgla, przy obserwowanym spadku emisji tlenków azotu.

Konkludując, zaobserwowane efekty procesu spalania z recyrkulacją wskazują na możliwość znaczącego ograniczenia emisji tlenków azotu, co wynika m.in. z obniżenia temperatury spalania na skutek obecności pary wodnej, azotu i CO₂ zawartych w recyrkulowanym strumieniu spalin. Obecność resztkowego tlenu w recyrkulowanych gazach umożliwia dodatkowe utlenianie produktów częściowego spalania, takich jak CO i sadza, prowadząc do ich konwersji w CO₂. Efekt ten obserwowany był szczególnie wyraźnie przy pełnym obciążeniu cieplnym kotła.

Na podstawie uzyskanych wyników oraz analizy procesu, opracowano rozwiązanie techniczne układu recyrkulacji, stanowiące podstawę zgłoszenia patentowego (numer zgłoszenia: Pat.243395). Przedmiotem ochrony był zawór regulacyjny umożliwiający adaptacyjne sterowanie udziałem spalin kierowanych do ponownego doprowadzenia do strefy spalania (Ryc. 9).



a)



b)

Ryc. 9. Schemat zaworu recyrkulacji spalin dla kotła grzewczego na paliwa stałe

a) montaż układu w kotle, b) układ regulacji recyrkulacji spalin [oprac. własne].

Podsumowując, uzyskane wyniki potwierdzają zasadność prowadzenia dalszych badań nad zastosowaniem recyrkulacji spalin jako narzędzia wspomagającego redukcję emisji zanieczyszczeń w kotłach grzewczych na biomasę. Prace te powinny mieć charakter interdyscyplinarny, obejmując inżynierię cieplną, mechanikę płynów, analizę emisji i automatykę, a ich kontynuacja może przyczynić się do opracowania systemów o wyższej efektywności środowiskowej i energetycznej.

4.3.6. Opracowanie modeli emisji zanieczyszczeń dla kotłów opalanych biomasą w funkcji tlenu resztkowego w spalinach

W ramach realizacji celu badawczego C3 przeprowadzono kompleksowe badania eksperymentalne, których celem było opracowanie matematycznych modeli emisji wybranych zanieczyszczeń w funkcji zawartości tlenu resztkowego (O_2) w spalinach. Badania te przeprowadzono dla kotłów grzewczych opalanych pelletem drzewnym, w typowym zakresie mocy od 12 kW do 30 kW, co odpowiada najczęściej spotykanym rozwiązaniom w indywidualnych systemach ogrzewania budynków mieszkalnych.

Zakres przeprowadzonych badań obejmował ciągły pomiar emisji pięciu kluczowych składników gazowych generowanych w procesie spalania biomasy drzewnej w postaci pelletu: tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO_2), tlenków azotu (NO_x), dwutlenku siarki (SO_2) oraz węglowodorów nienasyconych (C_xH_y). Pomiary prowadzono na kotłach grzewczych wyposażonych w automatyczny system podawania paliwa. Każdy z testowanych kotłów pracował przy swojej mocy nominalnej, odpowiadającej najczęściej spotykanym warunkom eksploatacyjnym w instalacjach domowych.

Pomiar zawartości tlenu resztkowego w spalinach realizowano za pomocą analizatora BRAGER BCA-02 ECO, którego zakres pomiarowy wynosił 0–22% objętości O_2 , a niepewność pomiarowa $\pm 0,8\%$. Z kolei do oznaczenia masowych stężeń CO_2 , CO , NO_x , SO_2 oraz C_xH_y zastosowano analizatory TESTO 350S oraz TESTO 330-2 LL, wyposażone w długowieczne ogniwa pomiarowe wykorzystujące techniki fotochemiczne. Dokładność pomiarowa wynosiła $\pm 10\%$ dla CO_2 , CO , NO_x , SO_2 i C_xH_y oraz $\pm 8\%$ dla NO_2 . Częstotliwość próbkowania ustalono na jedną próbkę na sekundę, a pojedynczy cykl pomiarowy dla każdego kotła trwał nieprzerwanie, co najmniej 3 godziny.

Rejestracja danych emisyjnych odbywała się z wykorzystaniem zaawansowanego systemu rejestrującego, opartego na kartach pomiarowych zintegrowanych w łańcuchu pomiarowym zaprojektowanym w środowisku programistycznym LABview. Uzyskane dane zostały następnie poddane analizie statystycznej i uśrednione dla wybranych poziomów mocy cieplnej, co umożliwiło opracowanie wiarygodnych modeli emisji zanieczyszczeń w funkcji zawartości tlenu resztkowego w spalinach.

W celu matematycznego opisu emisji wybranych składników gazowych powstających podczas spalania pelletu drzewnego zastosowano klasyczne metody interpolacyjne. Wynika to z faktu, iż do tej pory nie opracowano powszechnie uznanych funkcji opisujących przebieg emisji zanieczyszczeń w warunkach niskotemperaturowego spalania biomasy drzewnej. W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych uzyskano wartości emisji dla wybranych punktów pracy kotłów, zdefiniowanych przez zawartość tlenu resztkowego (O_2) w spalinach. Pozwoliło to przyjąć założenie, że emisja danego składnika szkodliwego może być modelowana jako funkcja zawartości tlenu resztkowego w spalinach. Interpolacja polega na wyznaczeniu wartości funkcji $f(x)$ w dowolnym punkcie należącym do przedziału $(x_0, x_1, \dots, x_n)$, na podstawie znanych wartości tej funkcji w tzw. węzłach interpolacji:

$$x_0, x_1, \dots, x_n \quad \text{gdzie} \quad x_0 < x_1 < \dots < x_n \quad (2)$$

Dla przyjętego zestawu danych eksperymentalnych zastosowano interpolacyjny wielomian $W_n(x)$ stopnia nie wyższego niż n , spełniający warunek:

$$W_n(x_i) = y_i \quad \text{dla} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Wielomian interpolacyjny można zapisać w postaci ogólnej:

$$W_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (4)$$

Podstawiając kolejne węzły interpolacji, uzyskujemy układ równań liniowych o $n+1$ niewiadomych (współczynniki $a_0, a_1, \dots, a_n$). Macierz współczynników tego układu jest tzw. macierzą Vandermonde'a:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dla $x_i \neq x_j$ ($i \neq j$), układ ten ma dokładnie jedno rozwiązanie, a jego współczynniki mogą zostać wyznaczone na podstawie twierdzenia Cramera:

$$Aa_i = \frac{1}{A} \sum_{j=0}^n y_j A_{ij} \quad (6)$$

Zastosowanie opisanej metody interpolacji umożliwiło wyznaczenie równań emisji dla każdego z analizowanych zanieczyszczeń. W tych równaniach zmienną niezależną x stanowi zawartość tlenu resztkowego w spalinach, natomiast zmienną zależną y obliczana emisja danego składnika. Dzięki temu, znając poziom O_2 w spalinach (parametru standardowo monitorowanego w nowoczesnych systemach sterowania kotłami) możliwe jest szybkie i dokładne oszacowanie emisji danego zanieczyszczenia w warunkach pracy urządzenia grzewczego. Opracowane modele matematyczne są szczególnie przydatne w analizach numerycznych, projektowaniu algorytmów sterowania oraz ocenie wpływu zmiennych eksploatacyjnych na środowiskową efektywność kotłów opalanych biomasą.

Na podstawie danych pomiarowych opracowano zestaw równań regresyjnych, stanowiących modele emisji dla każdej z analizowanych substancji. Modele te charakteryzują się wysoką zgodnością z rzeczywistymi wynikami pomiarów, odwzorowanie rzeczywistego przebiegu emisji mieściło się w przedziale 93–96% (R^2), co potwierdza ich trafność oraz potencjał aplikacyjny (Ryc. 10).

Harmful substance	Mathematical model	Representation accuracy
CO	$CO [mg/m^3] = -4,733 \cdot O_2 [\%] + 312.478$	94.49%
CO ₂	$CO_2 [mg/m^3] = -0,890 \cdot O_2 [\%] + 17.351$	96.26%
NO _x	$NO_2 [mg/m^3] = 0,109 \cdot O_2 [\%] + 191.008$	93.09%
SO ₂	$SO_2 [mg/m^3] = -5,620 \cdot O_2 [\%] + 195.445$	95.33%
C _x H _y	$C_xH_y [mg/m^3] = -6,180 \cdot O_2 [\%] + 147.633$	94.14%

Ryc. 10. Modele matematyczne wraz z dokładnością odwzorowania dla wybranych zanieczyszczeń [oprac. własne].

Opracowane modele mają zastosowanie zarówno w analizach naukowych, jak i w praktycznych implementacjach w technologii spalania biomasy. W szczególności mogą być wykorzystane:

- w analizach numerycznych przebiegu procesu spalania biomasy w warunkach rzeczywistych, zwłaszcza dla niskich strumieni masy paliwa (do ok. 8–10 kg/h), w zakresie temperatur nieprzekraczających granicznej temperatury spalania biomasy ($<1200\text{ K}$),
- w systemach automatyki kotłów, jako element algorytmów regulacyjnych opartych na wartości tlenu resztkowego w spalinach – parametrze powszechnie monitorowanym w nowoczesnych instalacjach grzewczych.

Kluczową zaletą opracowanych modeli jest ich bezpośrednie powiązanie z zawartością O_2 w spalinach, co stanowi praktyczny i mierzalny wskaźnik stanu spalania. Dzięki temu możliwe jest dynamiczne dostosowanie pracy kotła do aktualnych warunków eksploatacyjnych w celu minimalizacji emisji oraz poprawy sprawności energetycznej.

Wnioski płynące z przeprowadzonych badań wskazują, że odpowiednio skalibrowane modele emisji mogą stanowić podstawę dla rozwoju inteligentnych systemów zarządzania procesem spalania biomasy, w tym zaawansowanych układów sterujących opartych na logice adaptacyjnej lub predykcyjnej. W dalszej perspektywie możliwe jest także wykorzystanie tych modeli jako elementu symulacyjnych środowisk testowych dla nowych konstrukcji kotłów lub systemów oceny zgodności z wymaganiami ekoprojektu.

4.3.7. Badania nad zastosowaniem wodnego roztworu mocznika w kotłach grzewczych

W kolejnym etapie prac, w ramach głównego osiągnięcia naukowego (cel C4), przeprowadzono badania eksperymentalne dotyczące możliwości zastosowania wodnego roztworu mocznika $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ w procesie spalania w kotłach grzewczych zasilanych pelletem, w szczególności w palnikach retortowych. Głównym celem badań było ograniczenie emisji tlenków azotu (NO_x), uznawanych za jedno z najistotniejszych zanieczyszczeń powietrza generowanych przez niskotemperaturowe źródła ciepła.

Z przeglądu literatury wynika, że wttrysk roztworów amoniaku lub jego pochodnych, takich jak wodny roztwór mocznika, jest powszechnie stosowany w energetyce zawodowej i przemysłowej w ramach technologii selektywnej niekatalitycznej redukcji tlenków azotu (SNCR ang. *Selective Non-Catalytic Reduction*). Technologia ta była dotąd stosowana głównie w jednostkach o dużej mocy cieplnej. W omawianym przypadku po raz pierwszy podjęto próbę adaptacji tej technologii do warunków spalania w kotłach małej mocy, powszechnie wykorzystywanych w instalacjach indywidualnych dla mocy cieplnych, nie przekraczających 20 kW.

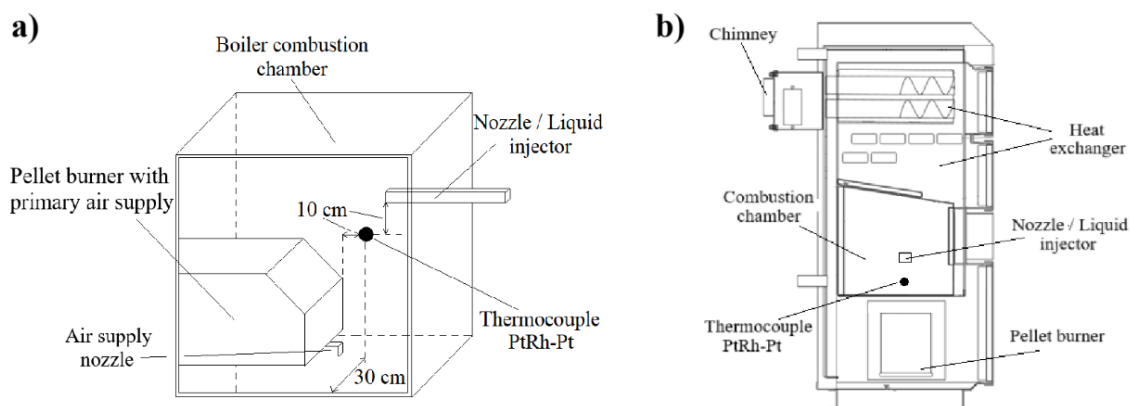
W ramach realizacji kolejnego etapu badań przeprowadzono eksperymenty mające na celu ocenę wpływu rodzaju biomasy oraz dawkowania wodnego roztworu mocznika na poziom emisji zanieczyszczeń w kotłach niskotemperaturowych. Badania zrealizowano z wykorzystaniem kotła Q EKO o mocy nominalnej 15 kW, z automatycznym podawaniem paliwa. Eksperymenty podzielono na dwa etapy. W pierwszym oceniano emisję szkodliwych substancji dla różnych typów pelletu: z trocin sosnowych i bukowych (biomasa drzewna) oraz z lucerny, słomy pszenicznej i żytniej (biomasa niedrzewna). W drugim etapie badano wpływ wtrysku wodnego roztworu mocznika do komory spalania przy stałej mocy nominalnej kotła. Do spalania dozowano roztwór o stałym stężeniu: 32,5% mocznika o wysokiej czystości i 67,5% wody demineralizowanej. Roztwór podawano z wykorzystaniem lancy z dyszą rozpylającą (kąt rozpylenia do 80°), przy maksymalnym przepływie 1,1 l/min i ciśnieniu do 0,13 MPa. Każdy z etapów trwał około 2 godzin i podzielony był na 30-minutowe okresy pomiarowe, dla których obliczano wartości średnie z poziomem ufności 95%. Badania przeprowadzono w quasi-stacjonarnych warunkach pracy kotła (odchylenie mocy $\pm 0,5$ kW). Biomasa zastosowana w badaniach została poddana analizie technicznej zgodnie z normami (Tab. 5).

Tab. 5. Analiza techniczna wykorzystanej w badaniach biomasy [oprac. własne].

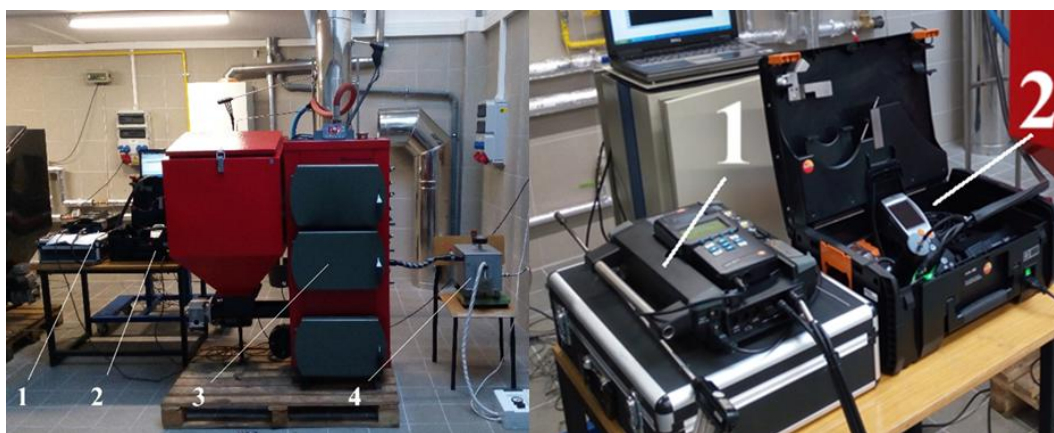
Parametr	Jednostka	Pellet				
		sosnowy	bukowy	lucerna	słoma pszeniczna	słoma żytnia
Wilgotność analityczna	[%]	5.00	10.00	9.90	10.89	9.00
Zawartość popiołu		0.47	0.41	5.33	7.90	6.60
Zawartość części lotnych		73.61	77.53	78.40	70.12	71.30
Fixed carbon (FC)		20.92	12.00	6.37	11.09	13.10
HHV	MJ/kg	14.93	17.38	15.21	14.06	13.93
LHV		14.32	16.06	13.87	12.81	12.62

Pomiar danych emisyjnych (Ryc. 11 i 12) realizowano przy pomocy układu pomiarowego opartego na środowisku LabVIEW i analizatorach gazów spalinowych Testo 350-S oraz 330-2 LL. Temperatura spalin rejestrowana była przez pięć czujników termoelektrycznych typu K w przewodzie kominowym. Natomiast temperatura w komorze spalania za pomocą jednego czujnika termoelektrycznego typu S (zakres mierzonych temperatur 830,7–960,2°C dla spalanych paliw), zainstalowanego w odległości ok. 100 mm od powierzchni paleniska i 100 mm poniżej strefy wtrysku reagenta. Dla każdego rodzaju paliwa określono:

- zużycie paliwa (masa przed i po teście),
- strumień masowy paliwa (od 3,74 kg/h do 4,75 kg/h),
- stechiometryczny przepływ powietrza (19,94–25,12 m³/h),
- masowe stężenia NO_x, CO, PM i zawartość O₂ w spalinach,
- charakterystykę emisji dla różnych strumieni reagenta w dawkach: 0,10; 0,20 oraz 0,50 kg/h.



Ryc. 11. Stanowisko badawcze, a) schemat układu komory spalania, b) przekrój kotła [oprac. własne].

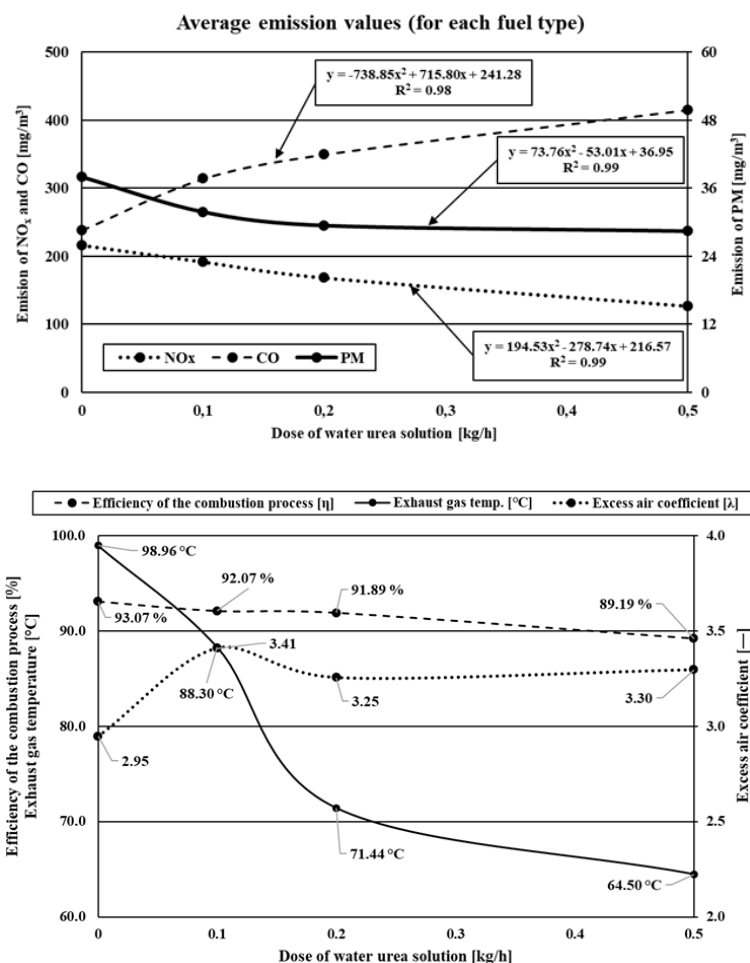


Ryc. 12. Stanowisko badawcze, 1 – Testo 350-S, 2 – Testo 380 i 330-2 LL, 3 – kocioł Q EKO 15, 4 – układ dozowania wodnego roztworu mocznika [oprac. własne].

Zauważono, że dla strumienia roztworu przekraczającego 0,50 kg/h (ok. 30% masy spalanych pelletów) dochodziło do negatywnych zjawisk gaszenia płomienia, obniżenia temperatury spalania i wzrostu emisji CO. Zaobserwowano, że dla przygotowanej konfiguracji badawczej optymalny stosunek masowy reagent/paliwo nie powinien przekraczać 30%, aby nie zakłócić procesu spalania.

Zastosowany układ wtrysku (Ryc. 11) umożliwiał precyzyjne dawkowanie cieczy wprost do płomienia generowanego w palniku retortowym. Otrzymane wyniki (Ryc. 13) wykazały

znaczną zależność poziomu emisji NO_x i CO od rodzaju biomasy oraz intensywności dawkowania roztworu mocznika.



Ryc. 13. Wyniki z zrealizowanych badań [oprac. własne].

W ramach przeprowadzonych badań zaobserwowano istotne zmiany parametrów emisyjnych oraz efektywności cieplnej kotła w funkcji dawkowania wodnego roztworu mocznika. Wraz ze wzrostem strumienia roztworu podawanego do komory spalania zaobserwowano systematyczny spadek sprawności cieplnej kotła (linia przerywana, Ryc. 13). Spadek ten jest wynikiem działania wielu współzależnych czynników, takich jak: zwiększona emisja tlenku węgla (CO), obniżenie temperatury w komorze spalania, wzrost zawartości tlenu resztkowego w spalinach oraz obniżona sprawność energetyczna całego układu. Zjawiska te wskazują na stopniowe przejście procesu spalania w stronę niepełnego utleniania paliwa i pogorszenia wykorzystania energii chemicznej biomasy. Szczególną uwagę zwrócono na spadek sprawności cieplnej podczas dawkowania mocznika, co można wyjaśnić endotermicznym charakterem reakcji rozkładu i utleniania amoniaku. Reakcje te pochłaniają ciepło z procesu spalania, obniżają

jąc efektywną ilość energii dostępnej do ogrzewania medium grzewczego. Dodatkowo, w warunkach niewystarczającego czasu przebywania reagenta w strefie spalania lub przy ograniczonym mieszaniu. Dla ustawionych dawek reagenta wyliczono następujące stosunki NH_3/NO :

- dla dawki 0,1 kg/h roztworu, $\text{NH}_3/\text{NO} \approx 4,96$,
- dla dawki 0,2 kg/h roztworu, $\text{NH}_3/\text{NO} \approx 9,92$,
- dla dawki 0,5 kg/h roztworu, $\text{NH}_3/\text{NO} \approx 24,81$,

Powyższe wartości świadczą o znacznie nadmiarowym dozowaniu środka redukującego (zakres literaturowy 1,0 – 1,2). Stosowanie zbyt dużych dawek nie tylko jest nieefektywne ekonomicznie, ale również może prowadzić do wtórnej emisji amoniaku, tworzenia aerozoli lub zanieczyszczenia komory spalania. Możliwe jest pojawienie się zjawiska poślizgu amoniaku (ang. *ammonia slip*), który prowadzi do strat energetycznych oraz emisji nieprzereagowanych związków azotu. Wskazane jest, aby w przyszłych badaniach uwzględnić bezpośrednie pomiary zawartości amoniaku resztkowego oraz nieprzereagowanych węglowodorów w spalinach i na ich podstawie precyzyjnie regulować dawki reagenta do reakcji spalania zachodzącej w kotle.

Równolegle zaobserwowano wzrost współczynnika nadmiaru powietrza (linia kropkowana), który przy wzroście dawki roztworu mocznika wykazywał trend rosnący. Szczególne zakłócenia przebiegu procesu spalania zidentyfikowano w przedziałach dawkowania 0,00–0,10 kg/h oraz 0,20–0,50 kg/h. W tych zakresach rejestrowano nagły wzrost emisji CO, który świadczy o zaburzeniach stechiometrii mieszania paliwa i powietrza, a co za tym idzie pogorszenia warunków utleniania cząstek węgla. Szczególnie wyraźny wzrost emisji CO (nawet o 60% dla biomasy drzewnej i 117% dla nie drzewnej) występował przy najwyższym dawkowaniu 0,50 kg/h.

Obniżenie temperatury gazów wylotowych (linia ciągła) wraz ze wzrostem dawki wodnego roztworu mocznika wskazuje na zwiększoną absorpcję ciepła przez ciecz oraz zakłócenie termodynamiki spalania. Niższe temperatury mogą prowadzić do przedwczesnego wygaszenia płomienia (tzw. *quenching*), co dodatkowo pogarsza proces utleniania i zwiększa emisję produktów niepełnego spalania. Wskazuje się, że przyjęty sposób dozowania mocznika nie pozwalał na uzyskanie temperatury spalania amoniaku przekraczającej 500°C , co jest wartością graniczną dla jego efektywnej reakcji z NO_x . Analiza rozkładu temperatur wykazała lokalne strefy wysokotemperaturowe ($>850^\circ\text{C}$) w pobliżu palnika, gdzie prawdopodobnie dochodziło do częściowej oksydacji amoniaku. Jednakże niejednorodność pola temperatur i ograniczone mieszanie skutkowało niepełną konwersją reagenta.

W odniesieniu do emisji tlenków azotu (NO_x), niezależnie od rodzaju biomasy, każdorazowe dawkowanie mocznika prowadziło do ich redukcji. Największy spadek na poziomie ok. 43% odnotowano dla biomasy drzewnej przy dawkowaniu 0,50 kg/h. Dla biomasy nieдрzewnej redukcja wynosiła ok. 39% dla tej samej dawki.

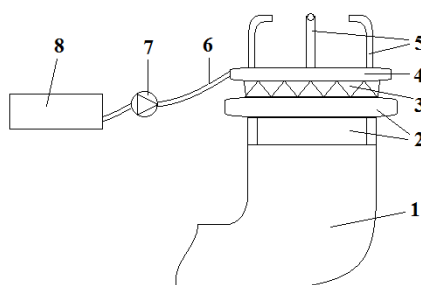
Dla emisji tlenku węgla (CO) odnotowano przeciwny trend, wraz ze wzrostem dawki mocznika wzrastała również emisja CO. Maksymalna emisja wystąpiła przy dawkowaniu 0,50 kg/h, osiągając wzrost o 60% dla biomasy drzewnej i aż o 117% dla biomasy nieдрzewnej w porównaniu do pracy bez dawkowania reagenta.

W zakresie emisji pyłu zawieszonego (PM), obserwowano trend analogiczny do NO_x . Dla biomasy nieдрzewnej uzyskano redukcję emisji na poziomie ok. 34%, a dla biomasy drzewnej ok. 19%. Potwierdza to, że obecność wodnego roztworu mocznika wpływa na ograniczenie emisji cząstek stałych, jednak kosztem wzrostu emisji gazowych produktów niepełnego spalania.

Niezależnie od rodzaju analizowanego zanieczyszczenia, rosnący strumień wodnego roztworu mocznika wyraźnie wpływał na zmiany parametrów emisji. Trend zmian miał charakter progresywny, im większa dawka reagenta, tym silniejsza odpowiedź układu emisyjnego (w kierunku redukcji lub wzrostu stężeń zależnie od typu zanieczyszczenia). Wnioski te stanowią podstawę do dalszej optymalizacji technologii SNCR w warunkach niskotemperaturowych oraz konieczność dokładnego bilansowania dawek reagentów względem aktualnych warunków cieplnych i składu spalin.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano kompletne rozwiązanie technologiczne, które zostało zgłoszone do ochrony patentowej (numer zgłoszenia Pat.244253 – Ryc. 14). System ten może być stosowany zarówno w nowych, jak i istniejących konstrukcjach palników retortowych.

Dodatkowo wskazano perspektywiczne kierunki dalszych badań obejmujące m.in.: optymalizację geometrii wtrysku, ilości podawanego reagenta, a także zintegrowanie technologii SNCR z technikami katalitycznymi (SCR). Zidentyfikowano również potencjalne problemy wtórne, takie jak przecieki reagenta, jego obecność w spalinach (tzw. poślizg amoniaku), a także ryzyko korozji po stronie wymiennika ciepła kotła.



Ryc. 14. Schemat instalacji dozowania wodnego roztworu mocznika dla palników retortowych
[oprac. własne].

Objaśnienia: 1 – palnik, 2 – układ dozowania paliwa, 3 – pierścień powietrzny, 4 – kolektor zbiorczy reagenta, 5 – dysze wtryskowe, 6 – przewód, 7 – pompa, 8 – zbiornik na reagent.

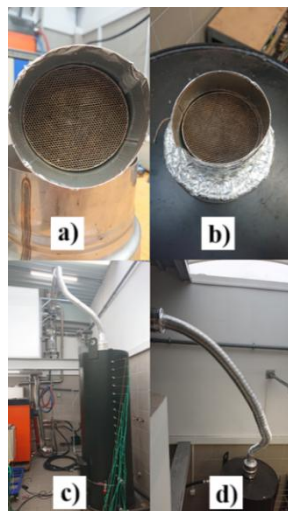
4.3.8. Badania nad zastosowaniem reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych w kotłach grzewczych

W ramach realizacji celu badawczego C5 przeprowadzono kompleksowe prace badawczo-rozwojowe w zakresie zastosowania reaktorów katalitycznych typu SCR (ang. *Selective Catalytic Reduction*) oraz filtrów cząstek stałych PMF (ang. *Particulate Matter Filter*) w kotłach grzewczych zasilanych biomasą. Celem badań była ocena skuteczności ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych przy użyciu układów powszechnie stosowanych w przemyśle i transporcie, które dotychczas nie były szeroko implementowane w kotłach grzewczych na paliwa stałe.

Pierwszym etapem prac był przegląd literatury dotyczący dostępnych technologii oczyszczania spalin. Wykazano, że reaktory katalityczne typu SCR oraz filtry cząstek stałych znajdują szerokie zastosowanie w dużych instalacjach energetycznych, układach przemysłowych oraz pojazdach silnikowych. W odniesieniu do kotłów grzewczych na paliwa stałe, zwłaszcza w segmencie małej mocy, techniki te nie są obecnie standardem, mimo rosnących wymagań środowiskowych. Odnotowano także rosnące zainteresowanie zastosowaniem elektrofiltrów i systemów jonizacji, jednakże rozwiązania te nie osiągnęły dotychczas poziomu komercyjnego wdrożenia.

Kolejny etap obejmował badania eksperymentalne z wykorzystaniem stanowiska badawczego wyposażonego w monoblokowy reaktor SCR oparty na platynowym nośniku katalitycznym (tzw. suchy SCR) oraz filtr cząstek stałych (Ryc. 15). Eksperymenty przeprowadzono dla dwóch wariantów: pracy kotła bez zastosowania układu oraz z jego aktywnym udziałem. Testy

wykonano przy mocy nominalnej kotła, spalając pellet drzewny. Wyniki wykazały znaczną skuteczność systemu w ograniczaniu emisji, jednak także ograniczenia w zakresie stosowalności układów katalitycznych w przypadku innych paliw stałych (Tab. 6).



Ryc. 15. Widok reaktora katalitycznego z filtrem cząstek stałych oraz stanowiska badawczego

a) filtr cząstek stałych, b) reaktor SCR, c) stanowisko badawcze, d) układ spalinowy [oprac. własne].

W szczególności, zaobserwowano, że zastosowanie katalizatora platynowego w warunkach spalania paliw węglowych jest nieefektywne, ze względu na wysoką zawartość siarki i wynikającą z niej emisję SO_2 . W obecności platyny i tlenków tytanu dochodzi do trwałej dezaktywacji katalizatora na skutek tworzenia siarczanów, co znacząco ogranicza jego zdolność do konwersji tlenku azotu (NO) do NO_2 . W związku z tym wskazano, że zastosowanie reaktorów SCR z nośnikami szlachetnymi powinno być ograniczone wyłącznie do spalania biomasy, która charakteryzuje się niską zawartością siarki.

Tab. 6. Wyniki otrzymane w trakcie realizacji badań [oprac. własne].

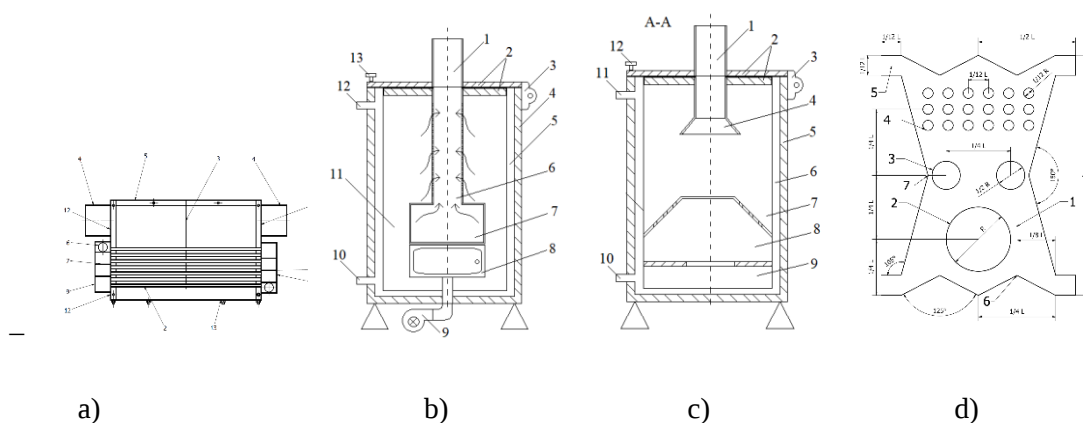
Parametr	Jednostka	Praca kotła z mocą znamionową, bez układu SCR i PMF	Praca kotła z mocą znamionową, z układu SCR i PMF	Wymagania normy
Tlenek węgla (CO)	[mg/m^3]	533,25	79,99	500
Tlenki azotu (NO_x)		451,40	81,25	—
Lotne związki organiczne (LZO)		18,85	5,39	20
Pyły (PM)		87,50	51,00	40

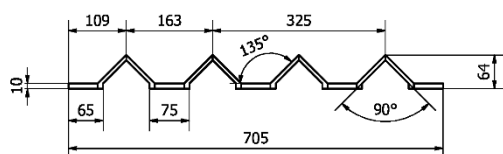
4.3.9. Opracowanie autorskich rozwiązań technicznych dla optymalizacji parametrów cieplnych i emisyjnych kotłów grzewczych

Ostatni etap prac badawczo-rozwojowych w ramach głównego osiągnięcia naukowego, określonego jako cel badawczy C6, obejmował projektowanie oraz walidację autorskich rozwiązań technicznych i technologicznych przeznaczonych do zastosowania w kotłach grzewczych na paliwa stałe. Głównym celem tych działań było podniesienie efektywności cieplnej urządzeń oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń poprzez modyfikację konstrukcji kluczowych elementów kotła.

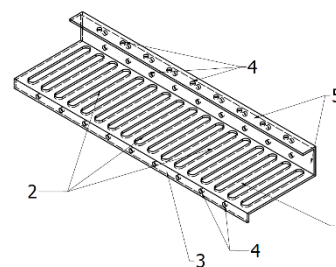
W ramach tego zadania opracowano i przetestowano szereg innowacyjnych komponentów systemów grzewczych, do których zalicza się:

- ekonomizer przeznaczony do kotłów kondensacyjnych, którego zadaniem jest odzysk ciepła ze spalin i zwiększenie ogólnej sprawności cieplnej urządzenia,
- konstrukcje kotłów dostosowanych do spalania odpadów leśnych i węglowych, charakteryzujących się zmiennym składem chemicznym i właściwościami energetycznymi paliwa,
- płyta sitowa, pełniąca funkcję stabilizującą przepływ powietrza oraz poprawiającą mieszanie się gazów w komorze spalania,
- turbulizator, umożliwiający zwiększenie intensywności wymiany ciepła w wymienniku kotła dzięki wzbudzaniu turbulencji w przepływie spalin,
- segment rusztu, optymalizujący rozkład paliwa w palenisku oraz poprawiający warunki spalania (Ryc. 16).





e)



f)

Ryc. 16. Widok autorskich rozwiązań technicznych wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

- a) ekonomizer do kotłów na biomase, b) kocioł na odpady węglowe, c) kocioł na odpady leśne,
d) płyta sitowa kotła, e) turbulizator spalin, f) segment rusztu kotła [oprac. własne].

Uwzględniono również kwestie kompatybilności nowych elementów z istniejącymi konstrukcjami urządzeń grzewczych. Efektem prac była pełna dokumentacja techniczna i technologiczna umożliwiaющая wytworzenie i wdrożenie wskazanych rozwiązań. Opracowania te zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej, gdzie uzyskały formalne decyzje o udzieleniu prawa wyłącznego w formie patentów lub wzorów użytkowych. W przypadkach, w których proces postępowania był w toku, uzyskano pozytywne opinie eksperckie wskazujące brak przesłanek uniemożliwiających udzielenie ochrony.

Autorskie rozwiązania technologiczne opracowane w ramach celu C6 stanowią istotny wkład w rozwój techniki spalania paliw stałych w kotłach grzewczych, zorientowanej na poprawę efektywności energetycznej, redukcję emisji oraz dostosowanie urządzeń grzewczych do zaostających się norm środowiskowych.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W 2019 r, zrealizowałem projekt pt. *Innowacyjny kocioł kondensacyjny na pellet* (nr projektu 05/56/PRJG/5139, którego efektem było zaprojektowanie i wdrożenie do produkcji szeregu kotłów grzewczych na pellet drzewny wraz z układem kondensacji wilgoci spalin. Produkt został wdrożony z sukcesem przez firmę Termotechnika wdrażając rozwiązanie pod marką Ecomat.

W 2022 r. zrealizowałem prace badawczo-rozwojowe w ramach projektu pt. *Komora klimatyczna do badań powietrznych pomp ciepła zgodnie z normami PN-EN 14511 i PN-EN*

14825 – wdrożenie i uruchomienie. Efektem zrealizowanych prac badawczo-rozwojowych było wdrożenie przemysłowe przez firmę Heiztechnik sp. z o.o. komory klimatycznej do badania powietrznych pomp ciepła na zgodność z obowiązującymi normami. Pracę realizowałem w ramach miesięcznego stażu przemysłowego realizowanego w tej firmie.

W 2023 r. zrealizowałem prace badawczo-rozwojowe w ramach projektu pt *Analiza możliwości zastosowania automatycznego układu regulacji pracującego w oparciu o analizator BCA-02 do poprawy parametrów energetyczno-emisyjnych kotłów grzewczych na paliwa stałe w warunkach rzeczywistej eksploatacji*. Efektami zrealizowanych prac badawczo-rozwojowych były wdrożenia przemysłowe przez firmę Brager sp. z o.o.

- symulatora emisji substancji szkodliwych z kotłów grzewczych na paliwa stałe w systemie eco7zone,
- symulatora kosztów ogrzewania przy wykorzystaniu kotła grzewczego na paliwo stałe w systemie eco7zone.

Pracę realizowałem w ramach dwumiesięcznego stażu przemysłowego realizowanego w tej firmie.

W 2024 r. odbyłem czteromiesięczny staż naukowy na Uniwersytecie Kaliskim im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego. Staż dotyczył badań z zakresu optymalizacji cieplno-emisyjnej domowych źródeł ciepła na paliwa stałe. W ramach realizowanego programu stażowego przewidziano kompleksowe działania badawcze i rozwojowe, których celem było poszerzenie wiedzy oraz rozwój kompetencji w dziedzinie inżynierii mechanicznej oraz inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień optymalizacji cieplno-emisyjnej domowych źródeł ciepła. Pierwszym etapem programu było opracowanie szczegółowego zagadnienia badawczego, stanowiącego podstawę dalszych prac eksperymentalnych. Tematyka ta została zdefiniowana w kontekście potrzeb wynikających z aktualnych wyzwań środowiskowych i energetycznych, koncentrując się na analizie procesów spalania, emisji zanieczyszczeń oraz efektywności energetycznej domowych źródeł ciepła. Kolejnym etapem była budowa oraz konfiguracja stanowiska badawczego, a także przygotowanie szczegółowego programu badań, umożliwiającego realizację eksperymentów. Stanowisko zostało dostosowane do pracy z różnymi typami urządzeń, wyposażone w aparaturę pomiarową umożliwiającą analizę parametrów cieplnych oraz charakterystyk emisyjnych. Na podstawie przygotowanego planu przeprowadzono badania eksperymentalne, których celem było określenie

wpływu wybranych parametrów technicznych na pracę wybranych domowych urządzeń grzewczych. Dane pomiarowe zostały poddane analizie statystycznej i opracowane zgodnie z przyjętą metodyką. Równolegle z realizacją badań przeprowadzono przegląd literatury krajowej i zagranicznej, obejmujący zarówno aktualny stan wiedzy, jak i identyfikację istniejących luk badawczych (tzw. stan niewiedzy). Pozwoliło to na ugruntowanie podstaw teoretycznych prowadzonych prac oraz precyzyjne umiejscowienie projektu badawczego w kontekście współczesnych kierunków rozwoju nauk technicznych. Końcowym etapem programu była przygotowanie i opracowanie publikacji naukowej prezentującej wyniki uzyskane w trakcie stażu. Publikacja została przygotowana do złożenia w czasopiśmie naukowym indeksowanym w bazach „Listy Filadelfijskiej” i zaplanowana do opublikowania w trybie Open Access, z wyraźnym wskazaniem, że powstała w ramach realizowanego programu stażowego.

Efektami zrealizowanego stażu naukowego były następujące publikacje:

- Ciupek B., Frąckowiak A. 2024, *Review of Thermal Calculation Methods for Boilers—Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameters*, *Energies*, vol.17, no.24, s.6380–1–15, DOI: 10.3390/en17246380.
- Urbaniak R., Ciupek B., Grobelny P. 2025, *Experimental Analysis of Vacuum Solar Collectors as an Auxiliary Heating Source for Residential Buildings*, *Energies*, vol.18, no.5, s.1093–1–24, DOI: 10.3390/en18054093.

W 2025 r. odbyłem miesięczny staż naukowy na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. Staż dotyczył optymalizację procesów cieplnych i emisyjnych z pieców przemysłowych do obróbki cieplno-chemicznej. W ramach realizowanego stażu naukowego uczestniczyłem w interdyscyplinarnych pracach badawczo-rozwojowych ukierunkowanych na opracowanie i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych służących ograniczaniu emisji gazów procesowych, w tym gazów cieplarnianych oraz substancji szkodliwych generowanych w procesach przemysłowych. Zakres współpracy obejmował pięć głównych obszarów badawczych:

- analizę i ocenę emisji gazów procesowych, z uwzględnieniem kluczowych parametrów środowiskowych oraz zmiennych operacyjnych typowych dla przemysłowych układów cieplnych,
- optymalizację warunków pracy pieców przemysłowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu temperatury i atmosfery chemicznej wewnątrz pieca,
- projektowanie oraz rozwój technologii neutralizacji emisji, obejmujące zarówno układy pasywne (np. katalizatory, filtry), jak i aktywne systemy kontroli emisji,

- opracowanie publikacji naukowej zawierającej wyniki współrealizowanych badań, przeznaczonej do opublikowania w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej, a także popularyzację wyników poprzez kanały akademickie i konferencyjne.

Staż naukowy miał charakter aplikacyjny i ukierunkowany był na wzmocnienie współpracy między Politechniką Krakowską a Politechniką Poznańską w zakresie badań nad dekarbonizacją przemysłu i rozwojem technologii środowiskowych. Podjęte działania wpisują się w aktualne światowe trendy zorientowane na ochronę klimatu, transformację energetyczną oraz wdrażanie zasad zrównoważonego rozwoju w sektorze przemysłowym.

Efektami zrealizowanego stażu naukowego były następujące prace:

- Ciupek B., Nowak-Ocłoń M. 2025, Reduction of ammonia emissions from industrial furnace process gases using stationary catalytic systems, *Energy*, vol.331, DOI: 10.1016/j.energy.2025.137134.
- Zgłoszenie patentowe: *Rura wodna deflektorowa*, data przygotowanie zgłoszenia: 06.2025.

W 2025 r. realizowałem prace badawcze pod kierunkiem dr hab. inż. Adama Kozakiewicza, prof. WAT z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie ukierunkowane nad analizą koncepcyjną silnika lotniczego z odzyskiem ciepła i chłodzeniem międzystopniowym. W ramach badań przeanalizowano rozwiązania naukowe i techniczne mające na celu usprawnienie procesów termodynamicznych w nowoczesnych lotniczych silnikach turbinowych przez wykorzystanie dodatkowych wymienników ciepła. Kompleksowy przegląd literatury umożliwił opracowanie projektu koncepcyjnego silnika turbowentylatorowego, zawierającego zarówno chłodnicę międzystopniową, jak i rekuperator. Badania obejmowały oryginalną analizę parametryczną i optymalizację, przeprowadzoną dla dwóch konfiguracji silnika: jednej przeznaczonej dla samolotów wąskokadłubowych, a drugiej dla samolotów szerokokadłubowych. Badanie koncentrowało się na osiągnięciu wymaganego ciągu przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności. Wyniki wskazują, że integracja wymienników ciepła może znacząco zmniejszyć jednostkowe zużycie paliwa i zwiększyć moc lub ciąg silnika. Ponadto odzysk ciepła resztkowego ze spalin przez rekuperację przyczynia się do poprawy ogólnej sprawności energetycznej układu. W badaniu przeanalizowano również nowatorską konstrukcję kriogeniczną, która wykorzystuje ciekły wodór do chłodzenia chłodnicy międzystopniowej, rekuperatora i turbiny. Wykazano potencjał zwiększenia współczynnika obejścia, dalszego zmniejszenia zużycia paliwa i obniżenia emisji NO_x. Odkrycia te podkreślają potencjał połączonych strategii chłodzenia międzystopniowego i rekuperacji, które mogą poprawić zarówno ekonomikę, jak i ekologiczność, przy

optymalnych parametrach systemu zależnych od klasy samolotu. Badania te wpisują się w trwające prace, mające na celu zwiększenie sprawności silników turbinowych przez innowacyjne rozwiązania w zakresie zarządzania temperaturą.

Efektem zrealizowanego działania naukowego była następująca praca:

- Kozakiewicz A., Karpiński T., Ciupek B. 2025, Conceptual Analysis of Intercooled Recuperated Aero-Engines (IRA), *Energies*, vol.18, no.17, s.4706–1–15, DOI: 10.3390/en18174706.

W 2025 r. realizowałem prace badawcze w kooperacji z Politechniką Świętokrzyską w Kielcach i Ministerstwem Obrony Narodowej w Warszawie w zakresie zaawansowanej diagnostyki widmowej drgań silników odrzutowych z wykorzystaniem bezkontaktowej wibrometrii laserowej i metod Fouriera. W ramach badań wykorzystano zaawansowaną metodologię diagnostyczną do oceny usterek mechanicznych w wysokowydajnych silnikach odrzutowych z wykorzystaniem bezkontaktowej wibrometrii laserowej i analizy drgań opartej na transformacie Fouriera. Przebadano silniki Pratt & Whitney F100-PW-229 stosowane w samolotach F-16, badania te identyfikowały krytyczne punkty pomiarowe, w tym przekładnię, turbinę i wsporniki sprężarki. Sygnały drgań o wysokiej rozdzielczości zebrano w warunkach laboratoryjnych i przetworzono za pomocą technik Fast Fourier Transform (FFT) w celu wyodrębnienia cech w dziedzinie częstotliwości wskazujących na niewyważenie wirnika, zużycie łożysk i anomalie strukturalne. Analiza porównawcza silników nominalnych i zdegradowanych potwierdziła silne korelacje między przewidywaniami analitycznymi a empirycznymi wzorcami widmowymi. Zrealizowane badania miały szczególne znaczenie ze względu na brak narzędzi diagnostycznych i umożliwiających szybką detekcję uszkodzeń podzespołów silników turbinowych dostarczanych przez producentów OEM, co ma szczególne znaczenie ze względu na aktualne potrzeby Ministerstwa Obrony Narodowej w zakresie stałej dostępności i sprawności jednostek lotniczych w tym i samolotów bojowych F-16.

Efektem zrealizowanego działania naukowego była następująca praca:

- Prokopowicz W., Ciupek B., Maciąg A., Gajewski T., Sielicki P. 2025, Advanced Spectral Diagnostics of Jet Engine Vibrations Using Non-Contact Laser Vibrometry and Fourier Methods, *Energies*, vol.18, no.18, s.4837–1–22, DOI: 10.3390/en18184837

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

- Jestem promotorem pomocniczym pracy doktorskiej realizowanej na Politechnice Poznańskiej (Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki). Rozprawa doktorska mgr inż. Ireneusza Bauma dotyczy: *Opracowania konstrukcji niskoemisyjnego kotła kondensacyjnego małej mocy zasilanego biomasą*, Doktorat Wdrożeniowy.
- Otrzymałem list gratulacyjny dla wyróżniającego się nauczyciela akademickiego z rąk Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki (22.01.2021 r.).
- Otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Poznańskiej za wybitne osiągnięcia w pracy dydaktycznej w roku akademickim 2020/2021, naukowej i dydaktycznej w roku akademickim 2023/2024.
- Pełnię funkcję opiekuna Laboratorium Procesów Konwersji Energii (od 2019 r.).
- Pełnię funkcję Sekretarza w Wydziałowej Komisji Wyborczej, Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej (od 2024 r.).
- Pełnię funkcję koordynatora elerningu w Instytucie Energetyki Ciepłej (od 2023 r.).
- Byłem współorganizatorem wykładów otwartych z cyklu „Spotkania z przemysłem” zrealizowane w roku akademickim 2018/2019 na Politechnice Poznańskiej.
- Jestem wielokrotnym organizator i prelegentem w trakcie Drzwi Otwartych na Politechnice Poznańskiej oraz Salonie Maturzystów.
- Pełniłem funkcję opiekuna z ramienia przedsiębiorstwa (Politechnika Poznańska) w trakcie praktyk studenckich (letnie) w IEC czerwiec–sierpień 2023 r.
- Promowałem dziewięć prac dyplomowych na szczeblu inżynierskim i magisterskim.
- Wykaz prowadzonych przeze mnie zajęć dydaktycznych od momentu zatrudnienia na Politechnice Poznańskiej:
 - Elementy termodynamiki i mechaniki płynów – laboratorium,
 - Energetyka konwencjonalna – laboratorium,
 - Kotły przemysłowe – ćwiczenia,
 - Kotły przemysłowe – projekt,
 - Mechanika płynów – laboratorium,
 - Podstawy energetyki cieplnej – laboratorium,
 - Podstawy procesów cieplnych – ćwiczenia,
 - Podstawy procesów cieplnych – laboratorium,
 - Podstawy procesów cieplnych – wykład,

- Podstawy termodynamiki – ćwiczenia,
- Podstawy termodynamiki – laboratorium,
- Przygotowanie pracy dyplomowej z elementami badań naukowych – ćwiczenia,
- Spalanie paliw i biomasy – laboratorium,
- Termodynamika – laboratorium,
- Termodynamika techniczna – ćwiczenia,
- Termodynamika techniczna – laboratorium,
- Termodynamika techniczna – wykład,

7. Inne informacje.

- Jestem finalistą Konkursu na Pracę Inżynierską na Politechnice Poznańskiej organizowanego przez Veolia Energia Poznań oraz Politechnikę Poznańską (06.05.2016 r.).
- Otrzymałem Stypendium Miasta Poznania dla Wybitnych Młodych Naukowców (06.2023 r.).
- Pełnię funkcję Rzecznawcy Straży Miejskiej Miasta Poznania z zakresu domowych źródeł ciepła dla terenu Miasta Poznania (od 2024).
- Jestem członkiem zarządu Sekcji Energetycznej – SIMP.
- Jestem członkiem Polskiego Instytutu Spalania.
- Otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Poznańskiej za wybitne osiągnięcia w pracy naukowej w roku akademickim 2021/2022.
- Otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Poznańskiej za wybitne osiągnięcia w pracy naukowej i dydaktycznej w roku akademickim 2023/2024.
- Jestem inicjatorem podpisania porozumienia o współpracy między Katedrą Techniki Ciepłej a Centralnym Laboratorium Dozoru Technicznego – Urzędu Dozoru Technicznego.
- Jestem inicjatorem podpisania porozumienia o współpracy między Katedrą Techniki Ciepłej a Termotechniką.
- Jestem inicjatorem podpisania porozumienia o współpracy między Katedrą Techniki Ciepłej a LUMO Technika Grzewcza.
- Jestem inicjatorem doposażenia Laboratorium Procesów Konwersji Energii w nowoczesne urządzenia grzewcze na paliwa stałe i systemy ich sterowania.
- Ukończyłem szkolenie: Zarządzanie zadaniami w czasie (24.09.2021 r.).
- Ukończyłem szkolenie: Kierowanie zespołami w uczelni wyższej (16.11.2021 r.).

- Ukończyłem szkolenie: Wsparcie w kryzysie psychicznym w zakresie podstawowym (10.05.2022 r.).

W Tabeli 7 zamieszczono zestawienie dorobku naukowego nie wchodzącego w skład osiągnięcia naukowego. Zestawienie ma charakter ilościowy i jakościowy pod względem parametrów naukometrycznych (liczba punktów zgodnie z obowiązującą listą czasopism punktowanych według Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz parametr Impact Factor i Impact Factor pięcioletni, tam gdzie mają one zastosowanie.

Tabela 7. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze nie wchodzące w skład głównego osiągnięcia naukowego.

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba pkt. MNISW
1.	Monografia	2	160
2.	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w JCR (lista MNISW)	19	1951
3.	Publikacje naukowe w czasopismach nie indeksowanych w JCR (lista MNISW)	12	92
4.	Rozdziały w monografiach (lista MNISW)	8	160
5.	Patent	1	75
6.	Wzory użytkowe	1	30
7.	Zgłoszenia patentowe	10	–
8.	Dorobek łącznie	53	2468
9.	Sumaryczny IF	38,53	
10.	Sumaryczny IF-5	36,53	

.....
(podpis wnioskodawcy)