Centrum Badawcze Energetyki i Ochrony Środowiska
INSTYTUT BADAŃ STOSOWANYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Raport z realizacji badań stanowiskowych i analitycznych związanych z procesem spalania ekogroszku wraz z opinią ekspercką

Badania i raport wykonali:

dr hab. inż. Artur Badyda, prof. PW – kierownik pracy
dr hab. inż. Piotr Krawczyk, prof. PW
mgr inż. Jan Bihałowicz
inż. Piotr Kępa

Warszawa, 19 lutego 2021 r.

SPIS TREŚCI

1. PODSTAWA OPRACOWANIA ---------- 4

2. PROJEKT STANOWISKA I WARUNKI REALIZACJI BADAŃ ---------- 7

3. METODA BADAWCZA ---------- 9

3.1. METODA POBORU PRÓBEK GAZU I ANALIZY SKŁADU GAZÓW SPALINOWYCH ---------- 9

3.2. METODA POBORU PRÓBEK PYŁU I ANALIZY SKŁADU CHEMICZNEGO PYŁÓW ---------- 16

3.2.1. Przygotowanie filtrów i pobór próbek pyłu do badania ---------- 16

3.2.2. Analiza zawartości wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w pyle całkowitym ---------- 17

3.2.3. Analiza zawartości wybranych metali w pyle zawieszonym ---------- 18

3.3. METODA PROWADZENIA PROCESU BADAWCZEGO ---------- 19

3.4. POMIARY UZUPEŁNIAJĄCE ---------- 20

3.4.1. Pomiar z zastosowaniem kamery termowizyjnej ---------- 20

3.4.2. Pomiar stężenia zanieczyszczeń pyłowych we wnętrzu pomieszczenia ---------- 21

4. WYNIKI ANALIZ DOTYCZĄCYCH PALIWA ---------- 22

4.1. WYNIKI ANALIZ DLA WĘGLA EKOGROSZEK [XXX] ---------- 22

4.2. WYNIKI ANALIZ DLA WĘGLA EKOGROSZEK [YYY] ---------- 23

5. WYNIKI POMIARÓW STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W STRUMIENIU SPALIN ---------- 24

5.1. WYNIKI POMIARÓW STĘŻEŃ SUBSTANCJI GAZOWYCH ---------- 24

5.1.1. Pierwsza seria pomiarowa ---------- 24

5.1.2. Druga seria pomiarowa ---------- 28

5.1.3. Trzecia seria pomiarowa ---------- 31

5.1.4. Czwarta seria pomiarowa ---------- 34

5.1.5. Piąta seria pomiarowa (ekogroszek [YYY]) ---------- 37

5.1.6. Szósta seria pomiarowa (ekogroszek [YYY]) ---------- 40

5.2. Wyniki pomiarów stężeń pyłu całkowitego ---------- 42

5.3. Interpretacja wyników ---------- 43

6. WYNIKI ANALIZY STĘŻEŃ SUBSTANCJI ZAWARTYCH W PYLE CAŁKOWITYM ---------- 49

6.1. ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH WIELOPIERŚCIENIOWYCH WĘGLOWODORÓW AROMATYCZNYCH (WWA) W PYLE ---------- 49

6.2. ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH METALI W PYLE ---------- 52

7. WYNIKI POMIARÓW STĘŻEŃ FRAKCJI PYŁU $PM_{2,5}$ W POMIESZCZENIU ---------- 55

8. WYNIKI ANALIZ W ZAKRESIE ZAWARTOŚCI CZĘŚCI PALNYCH W ŻUŻLU ---------- 57

9. OBLICZENIA BILANSOWE KOTŁA ---------- 58

9.1. BILANS OBIEGU POWIETRZNO-SPALINOWEGO – SPOSÓB REALIZACJI OBLICZEŃ ---------- 58

9.1.1. Obliczeniowe określenie ilości oraz składu powstających spalin ---------- 59

9.1.2. Obliczeniowe określenie sprawności kotła i strumienia spalanego paliwa ---------- 60

9.1.3. Obliczeniowe określenie straty do otoczenia ---------- 64

10. WYNIKI OBLICZEŃ BILANSOWYCH OBIEGU POWIETRZNO-SPALINOWEGO ANALIZOWANEGO KOTŁA DLA WSZYSTKICH SERII POMIAROWYCH ---------- 66

11. OPINIA EKSPERCKA ---------- 72

11.1. OPIS WARUNKÓW TECHNICZNYCH BADANIA, WSKAZUJĄCY NA JEGO PRAWIDŁOWOŚĆ I MIARODAJNOŚĆ ---------- 72

11.2. OBJAŚNIENIE MOŻLIWOŚCI TECHNICZNYCH ZAINSTALOWANIA KOTŁA 5 KLASY PRZEZ KONSUMENTA ZGODNIE Z INSTRUKCJĄ ORAZ WSKAZANIE PRZYKŁADÓW TYPOWYCH I CZĘSTYCH NIEPRAWIDŁOWOŚCI POJAWIAJĄCYCH SIĘ PRZY INSTALACJI ---------- 73
11.3. OPIS PALIWA UŻYTEGO DO PRZEPROWADZENIA BADANIA ---------- 75
11.4. OBJAŚNIENIE WPŁYWU POSZCZEGÓLNYCH SUBSTANCJI CHEMICZNYCH WYKRYTYCH W BADANIU NA ZDROWIE CZŁOWIEKA I NA ŚRODOWISKO ---------- 75
11.5. ANALIZA PORÓWNAWCZA EMISJI ZE SPALANIA PRZEDMIOTOWEGO EKOGROSZKU I INNYCH PALIW (JAK NP. GAZ CZY LEKKI OLEJ OPAŁOWY) LUB INNYCH NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII STOSOWANYCH W OGRZEWNICTWIE ---------- 81
11.6. PORÓWNANIE EMISJI CO_2 ZE SPALANIA PRZEDMIOTOWEGO EKOGROSZKU ORAZ INNYCH FRAKCJI WĘGLA KAMIENNEGO I POZOSTAŁYCH WYBRANYCH PALIW (JAK NP. GAZ CZY LEKKI OLEJ OPAŁOWY) STOSOWANYCH W OGRZEWNICTWIE ---------- 83
11.7. OPIS STĘŻENIA PYŁÓW WEWNĄTRZ POMIESZCZENIA, GDZIE SPALANY BYŁ PRZEDMIOTOWY EKOGROSZEK ---------- 84
11.8. OCENA ZASADNOŚCI NAZYWANIA BADANEGO PALIWA EKOLOGICZNYM ---------- 84

12. ZAŁĄCZNIK 1 ---------- 87

13. ZAŁĄCZNIK 2 ---------- 89

14. ZAŁĄCZNIK 3 ---------- 91

15. ZAŁĄCZNIK 4 ---------- 95

16. ZAŁĄCZNIK 5 ---------- 96

Opinia ekspercka dotycząca rozmiaru i składu emitowanych do powietrza substancji chemicznych powstających w wyniku spalania ekogroszku.

1. Podstawa opracowania

Podstawą niniejszego opracowania jest umowa zawarta pomiędzy Fundacją ClientEarth Prawnicy dla Ziemi z siedzibą w Warszawie (00-680) przy ul. Żurawiej 45, a Arturem Badydą, prowadzącym działalność gospodarczą wpisaną do Centralnej Ewidencji i Informacji o Działalności Gospodarczej, pod numerem NIP: 113-239-89-45, dotycząca wykonania opinii eksperckiej w zakresie określenia rozmiaru i składu emitowanych do powietrza substancji chemicznych powstających w wyniku spalania ekogroszku firmy [XXX] w kotle 5 klasy, zmierzającej do ustalenia czy ekogroszek można uznać za paliwo ekologiczne. Realizacja niniejszej opinii została poprzedzona wykonaniem odpowiedniego stanowiska badawczego oraz badaniami zrealizowanymi przez Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o., jak również inne instytucje, którym zlecono realizację wybranych analiz.

Proces przygotowania stanowiska badawczego, realizację pomiarów emisji zanieczyszczeń gazowych, analizę wyników i badania bilansowe kotła wykonał zespół pracowników naukowych Politechniki Warszawskiej: dr hab. inż. Artur Badyda, prof. PW oraz dr hab. inż. Piotr Krawczyk, prof. PW oraz inż. Piotr Kępa. Pomiary emisji pyłu realizował mgr inż. Jan Bihałowicz ze Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Poniżej przedstawiono krótkie notki biograficzne głównych wykonawców:

- Artur Jerzy Badyda – doktor habilitowany nauk technicznych, profesor Politechniki Warszawskiej, pracownik badawczo-dydaktyczny na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska. Od 2016 r. kieruje Zakładem Informatyki i Badań Jakości Środowiska, a od 2010 r. również Laboratorium Badań Fizycznych Środowiska. Jego zainteresowania naukowe związane są ściśle z problematyką jakości powietrza atmosferycznego oraz tematyką środowiskowych uwarunkowań zdrowia, w tym zwłaszcza oddziaływania zanieczyszczeń powietrza na środowisko i zdrowie człowieka. Zainteresowania zawodowe skupione są wokół zagadnień związanych z zarządzaniem ochroną środowiska, monitorowaniem zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego, oddziaływaniem na środowisko dużych inwestycji infrastrukturalnych i przemysłowych, czy efektywnością energetyczną, jak również powszechną edukacją ekologiczną, w szczególności w obszarze skutków zdrowotnych narażenia na zanieczyszczenia powietrza. Zajmuje się również problematyką konsultacji społecznych w obszarze inwestycji infrastrukturalnych. Były doradca Ministra Środowiska. Wśród najważniejszych prac naukowych można wyróżnić:
    - Adamkiewicz Ł., Maciejewska K., Skotak K., Krzyżanowski M., Badyda A., Juda-Rezler, K., Dąbrowiecki P.“ Health-Based Approach to Determine Alert and Information Thresholds for Particulate Matter Air Pollution”. doi: 10.3390/su13031345. Sustainability, 13, 1345, 2021
    - Badyda A., Krawczyk P., Bihałowicz J.S., Bralewska K., Rogula-Kozłowska W., Majewski G., Oberbek P., Marciniak A., Rogulski M.: “Are BBQs Significantly Polluting Air in

Poland? A Simple Comparison of Barbecues vs. Domestic Stoves and Boilers Emissions". doi. 10.3390/en13236245. Energies 2020, 13, 6245

- Rogulski M., Badyda A.: "Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring". doi. 10.3390/atmos11101040. Atmosphere 2020, 11, 1040
- Czechowski P.O., Dąbrowiecki P., Oniszczuk-Jastrząbek A., Bielawska M., Czermański E., Owczarek T., Rogula-Kopiec P., Badyda A.: " A Preliminary Attempt at the Identification and Financial Estimation of the Negative Health Effects of Urban and Industrial Air Pollution Based on the Agglomeration of Gdańsk". doi: 10.3390/su12010042. Sustainability, 12, 42, 2020
- Mazurek H., Badyda A.: „Smog. Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczeń powietrza". Redakcja naukowa monografii, 212 stron, ISBN 978-83-200-5575-7, PZWL Wydawnictwo Lekarskie, Warszawa 2018
- Badyda A., Widziewicz K., Rogula-Kozłowska W., Majewski G., Jureczko I: "Inhalation Exposure to PM-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Released from Barbecue Grills Powered by Gas, Lump Charcoal, and Charcoal Briquettes". doi. 10.1007/5584_2017_51. Advances in Experimental Medicine and Biology, Volume 1023, pp. 11-27, 2018
- Firląg Sz., Rogulski M., Badyda A.: "The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas". doi: 10.3390/su10114231. Sustainability, 10(11), 4231, 2018
- Chłopek Z., Lasocki J., Wójcik P., Badyda A.J.: "Experimental investigation and comparison of energy consumption of electric and conventional vehicles due to the driving pattern". doi: 10.1080/15435075.2018.1529571. International Journal of Green Energy, 15:13, 773-779, 2018
- Badyda A., Grellier J., Dąbrowiecki P.: "Ambient PM2.5 Exposure and Mortality Due to Lung Cancer and Cardiopulmonary Diseases in Polish Cities". doi. 10.1007/5584_2016_55. Advances in Experimental Medicine and Biology, Volume 944, pp. 9-17, 2017

- Piotr Krawczyk – doktor habilitowany nauk technicznych, profesor Politechniki Warszawskiej, pracownik badawczo-dydaktyczny na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa. Jego sylwetkę charakteryzuje duży dorobek:
  - Naukowy (ok. 100 publikacji):
    - Krawczyk P., Szczygieł J., Analiza uwarunkowań stosowania paliwa alternatywnego do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w warunkach przedsiębiorstwa ciepłowniczego, Rynek energii 6 (109), 91-96
    - Badyda K., Krawczyk P., Pikoń K., Relative environmental footprint of waste-based fuel burned in a power boiler in the context of end-of-waste criteria assigned to the fuel, Energy 100, 425-430
    - Krawczyk P., Badyda K., Numerical analysis of the impact of parameters of urea solution injection on reagent penetration inside the combustion chamber of a WR 25 boiler, Rynek Energii 6 (115), 139-145
    - Wrzesińska B., Krzywda R., Wąsowski T., Krawczyk P., Badyda K. Technologia selektywnej niekatalitycznej redukcji tlenków azotu pod kątem zastosowania

jej w kotłach dla energetyki przemysłowej i ciepłownictwa, Przemysł Chemiczny 94 (4), 608-613

- Więckowski Ł., Krawczyk P., Badyda K., Numerical investigation of temperature distribution in the furnace of a coal fired grate boiler in part load conditions, Journal of Power Technologies 97 (5), 359-365
- Krawczyk P., Experimental investigation of N2O formation in selective non-catalytic NOx reduction processes performed in stoker boiler, Polish Journal of Chemical Technology 18 (4), 104-109
- Krawczyk P., Badyda K, Szczygieł J., Młynarz S., Investigation of exhaust gas temperature distribution within a furnace of a stoker fired boiler as a function of its operating parameters Archives of Thermodynamics 36, 2016
- Pikoń K., Krawczyk P., Badyda K., Bogacka M., Predictive analysis of waste co-combustion with fossil fuels using the life cycle assessment (LCA) methodology, Energies 12 (19), 3691

- W zakresie realizacji i kierowania pracami o charakterze aplikacyjnym (ok. 80 ekspertyz);
- W realizacji i kierowaniu projektami badawczymi (15 projektów finansowanych ze środków na naukę);

W niniejszym opracowaniu przedstawiono w szczególności:

- Charakterystykę stanowiska badawczego obejmującego zakupiony do celów badania kocioł posiadający certyfikat zgodności z wymogami normy PN-EN 303:5-2012 na poziomie 5 klasy oraz certyfikat zgodności z wymogami tzw. Dyrektywy Ekoprojektu (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią (Dz.U. L 285 z 31.10.2009, str. 10-35)), wraz z niezbędnym osprzętem,;
- Wyniki analiz składu elementarnego oraz parametrów paliwowych wykorzystywanych w czasie testów paliw, o których szerzej mowa w rozdziale 4 niniejszego opracowania;
- Wyniki analiz mających na celu określenie zawartości części palnych w ubocznych produktach spalania, stanowiących pozostałość po spaleniu badanego paliwa w stosownym urządzeniu, o którym szerzej mowa w rozdziale 2 niniejszego opracowania;
- Metodykę realizacji badania jako całości oraz metody wykonywania poszczególnych elementów badania, w tym zwłaszcza poboru próbek gazu i pyłu, analizy składu gazów spalinowych, analizy składu chemicznego pyłu pobranego u wylotu z kotła (pod kątem zawartości wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) oraz wybranych metali), jak również pomiarów stanowiących uzupełnienie zasadniczej części badań;
- Wyniki badań stanowiskowych w zakresie emisji wybranych zanieczyszczających substancji gazowych oraz w zakresie emisji pyłu całkowitego (TSP);
- Wyniki analiz zawartości wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych oraz wybranych metali w pobranych próbkach pyłu;
- Opinię ekspercką dotyczącą możliwości lub braku możliwości uznania wykorzystanego w badaniach paliwa za paliwo ekologiczne.

2. Projekt stanowiska i warunki realizacji badań

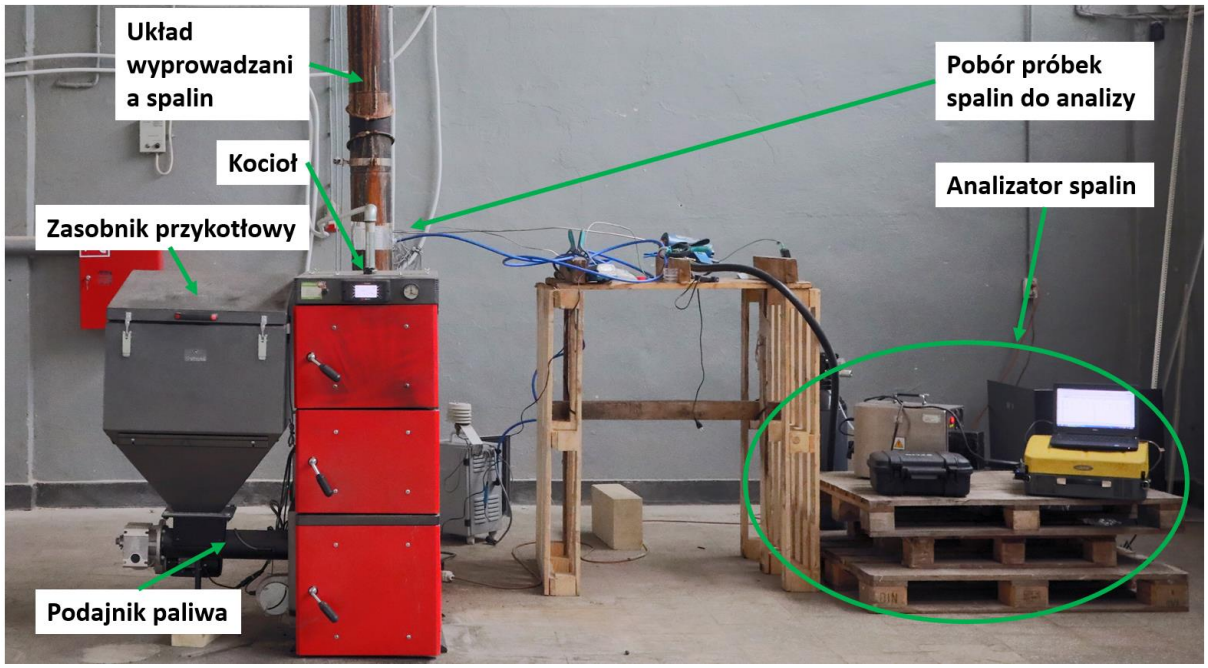
Stanowisko do badania parametrów emisyjnych oraz eksploatacyjnych kotła na ekogroszek zostało zaprojektowane oraz przygotowane przez zespół wykonawców niniejszej pracy. W skład stanowiska weszły standardowe elementy kotłowni opartej na kotle węglowym tj. m.in.:

- Kocioł na ekogroszek firmy [xxx], model [xxx] KWE 15kW;
- Układ wyprowadzania i rozpraszania ciepła wyposażony m.in. w pompę obiegową, układ stabilizacji ciśnienia oraz nagrzewnicę powietrza;
- Układ wyprowadzania spalin – komin.

Analizowana instalacja wyposażona została w elementy kontrolne i pomiarowe w zakresie:

- Parametrów eksploatacyjnych kotła (przepływ wody zasilającej; temperatura wody na powrocie, temperatura wody na zasilaniu);
- Temperatura spalin;
- Układ do pomiaru zanieczyszczeń gazowych w spalinach opuszczających kocioł;
- Układ do poboru próbek pyłu lotnego w spalinach opuszczających kocioł.

Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawiono na ilustracji (Rysunek 1). Kolejne ilustracje (Rysunek 2 i Rysunek 3) prezentują widok zasobnika kotła napełnionego węglem typu ekogroszek (specyfikację którego przedstawiono w rozdziale 4.1) oraz bardziej szczegółowy widok stanowiska badawczego z zaznaczeniem miejsc poboru próbek gazu (jak również pyłu) do badania.



Rysunek 1 Widok ogólny stanowiska badawczego

Rysunek 2 Widok zasobnika kotła z analizowanym węglem

Rysunek 3 Widok miejsca poboru próbek do analizy składu spalin oraz pomiaru ich temperatury na wylocie z kotła

Badania zrealizowano w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, w których użytkownicy korzystają z tego typu urządzeń. Taki bowiem miał być ich cel. Kocioł wraz z aparaturą pomiarową zlokalizowano w nieczynnej hali poprzemysłowej, umiejscawiając w niej również

niezbędny osprzęt, na który składały się w szczególności: pompa wody obiegowej, chłodnica wody obiegowej i armatura umożliwiająca odbiór i transport wody obiegowej, jak również komin umożliwiający ujęcie spalin i ich wyprowadzenie do powietrza atmosferycznego. Metoda prowadzenia badań została nieco bardziej szczegółowo opisana w rozdziale 3.3.

3. Metoda badawcza

3.1. Metoda poboru próbek gazu i analizy składu gazów spalinowych

Elementem stanowiska badawczego wykorzystanym do analizy składu spalin był analizator spalin Gasmet DX 4000. Poniżej zamieszczono charakterystykę podstawowych elementów wykorzystywanego analizatora.

GASMET to nazwa przyrządu służącego do analizy składu gazów w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego z wykorzystaniem transformacji Fouriera (ang. Fourier Transform Infrared (FT-IR) Gas Analyzer). Aparatura do analizy składu gazów składa się z następujących urządzeń:

- Analizatora GASMET, pracującego zgodnie z metodyką określoną w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody (FT-IR);
- Butli zawierającej gaz wzorcowy – azot o czystości 99,995 % (5,0);
- Węży podgrzewanych wraz z sondą pomiarową – grzany tor pomiarowy do temperatury 180°C;
- Układu podawania gazu (pompa), jego filtracji i kontroli temperatury węży (toru pomiarowego);
- Przenośnego komputera wraz z odpowiednim oprogramowaniem.

Zasada działania analizatora opiera się na zjawisku absorpcji pewnych długości fal promieniowania elektromagnetycznego, przechodzącego przez kuwetę wypełnioną gazem, którego skład jest oznaczany. Każdy z gazów absorbuje wybrane długości promieniowania podczerwonego. Promieniowanie oddziałuje z cząsteczką gazu powodując jej wzbudzenie – cząsteczka pobiera energię promieniowania, co powoduje jej drgania i ruch obrotowy. Energia zaabsorbowana przez gaz jest widoczna jako osłabienie promieniowania w charakterystycznych dla danego rodzaju gazu, zakresach długości fali.

Dla każdej długości promieniowania można określić transmitancję T, jako stosunek natężenia promieniowania, które przeszło poprzez próbkę, do natężenia promieniowania wejściowego:

$$T = \frac{I}{I_o}$$

gdzie:
I – natężenie promieniowania po przejściu przez próbkę;
I_0 – natężenie promieniowania wejściowego.

Jeśli gaz nie absorbuje promieniowania to transmitancja T=1 (lub 100%). Oznacza to brak gazu, który byłby odpowiedzialny za pochłanianie promieniowania przy danej długości fali w analizowanej mieszaninie gazów. Jeżeli transmitancja promieniowania przy danej długości fali jest mniejsza od 1

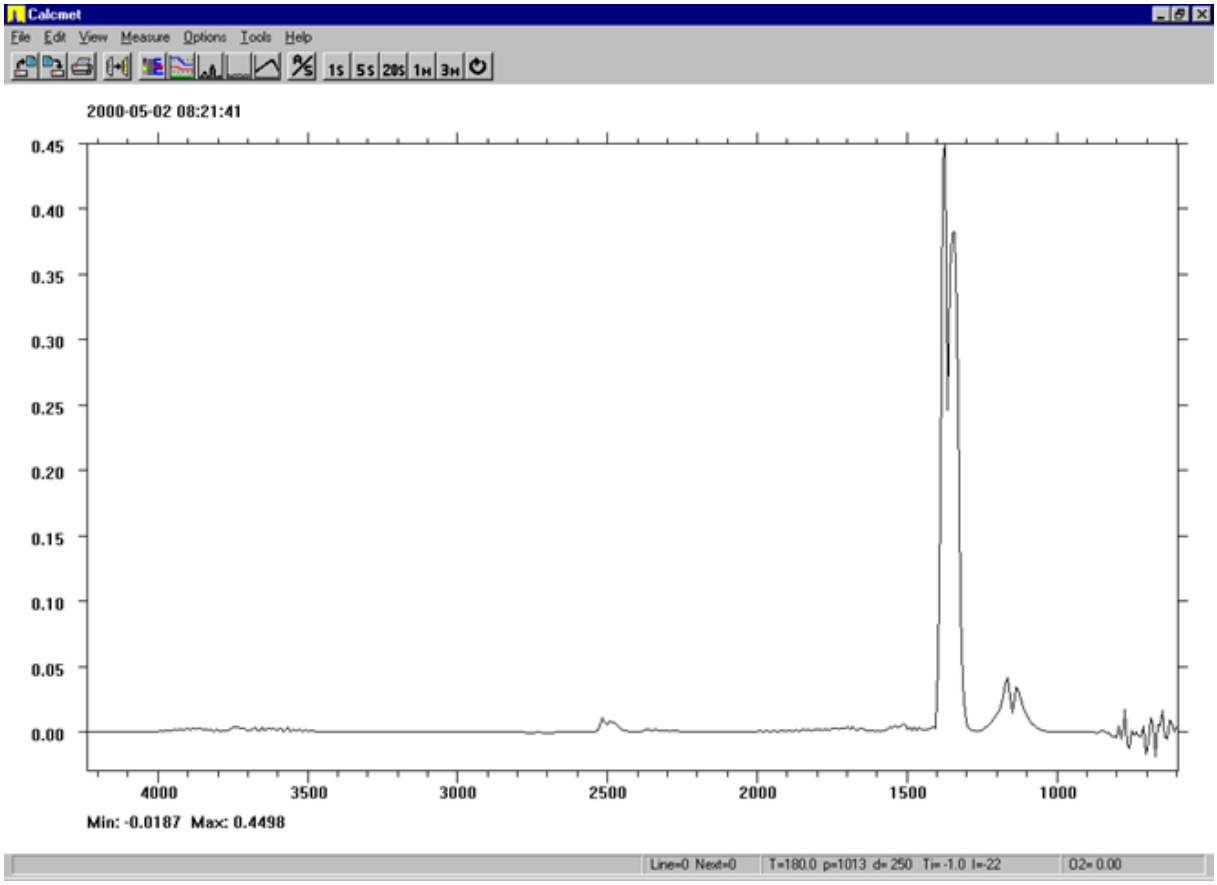
oznacza to, że promieniowanie uległo osłabieniu i dalej, że gaz, który jest odpowiedzialny za pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przy tej długości fali znajduje się w próbce.

Alternatywnie zamiast pojęcia transmitancji używane jest pojęcie absorpcji czyli tłumienia, oznaczone jako A:

$$A = \log_{10}\left(\frac{1}{T}\right)$$

gdzie:
T – transmitancja.

Używanie tłumienia A jest wygodne, gdyż jest ono proporcjonalne do długości drogi promieniowania w analizatorze oraz do koncentracji gazu w próbce. Ponieważ każdy gaz ma swój unikalny sposób absorpcji promieniowania, możliwa jest identyfikacja składników gazu poprzez analizę tłumienia promieniowania podobnie jak poprzez analizę transmitancji. Przykładowe spektrum absorpcyjne (dla SO_2) pokazano na ilustracji (Rysunek 4).



Rysunek 4 Widmo absorpcyjne dla SO_2

W czasie analizy składu mieszaniny gazowej niewystarczająca jest wiedza na temat obecności lub jej braku w odniesieniu do poszukiwanych składników. Wymagana jest wiedza na temat stężenia (koncentracji) poszukiwanych składników. W celu pozyskania takiej informacji wykorzystuje się prawo Beera. Jest ono podstawowym prawem wykorzystywanym przy spektroskopowej analizie ilościowej. Prawo to można zapisać w postaci wyrażenia:

$$\log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right) = \log_{10}\left(\frac{1}{T}\right) = A = a \cdot b \cdot c$$

gdzie:

I_o – natężenia promieniowania na wejściu do próbki;

I – natężenie promieniowania po przejściu przez próbkę;

A – absorpcja promieniowania;

T – transmitancja;

a=a(υ) – absorpcyjność próbki;

b – optyczna długość drogi promieniowania w próbce;

c – koncentracja substancji mierzonej (poszukiwanej) w próbce.

Absorpcyjność a=a(υ) jest stałą charakteryzującą zdolność molekuł do absorpcji promieniowania. Współczynnik ten jest wielkością stałą dla danej koncentracji molekuł i dla danego rodzaju molekuł, czyli rodzaju substancji badanej. Stanowi ona niejako daną materiałową charakterystyczną dla konkretnego gazu.

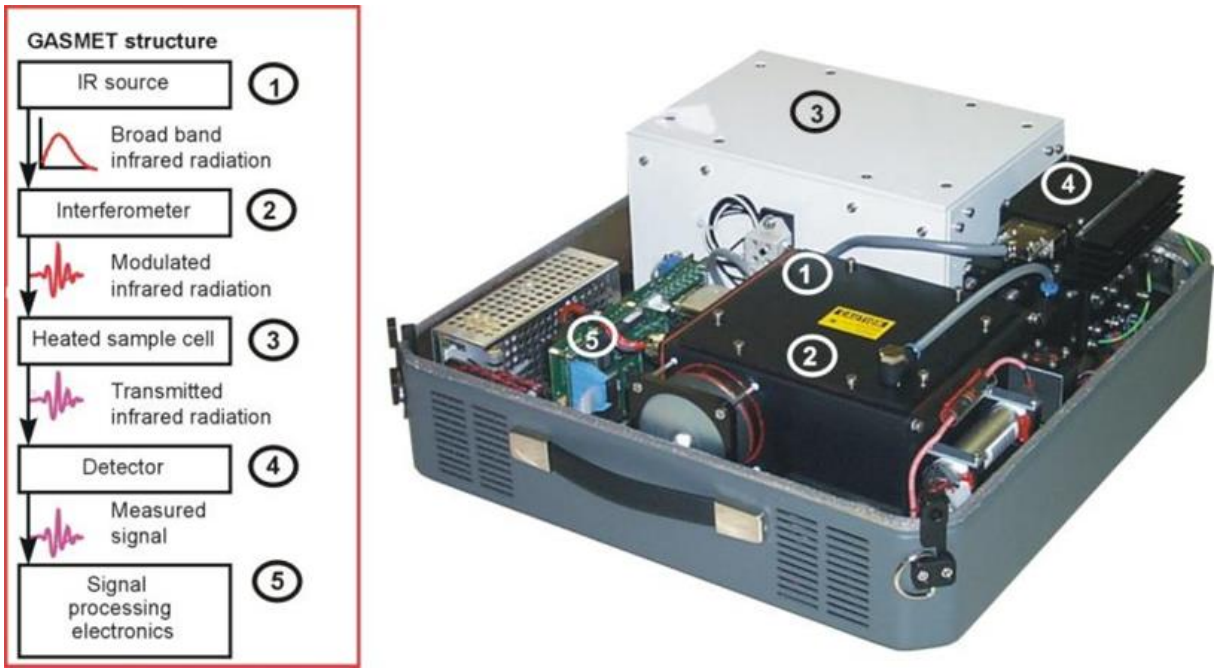
Optyczna długość drogi promieniowania w próbce jest wielkością stałą dla danego przyrządu. Jest to długość drogi, jaką pokonuje promieniowanie przechodząc przez badaną próbkę.

W przypadku analizatora GASMET optyczna długość drogi promieniowania w próbce jest wielkością stałą i wynosi 500 cm. Z prawa Beera wynika, że absorpcja jest wprost proporcjonalna do koncentracji gazu w próbce, a absorpcja całkowita A jest równa sumie absorpcyjności dla poszczególnych składników.

Wykorzystywana w analizatorze analiza widmowa opiera się na następujących założeniach:

- Promieniowanie jest promieniowaniem monochromatycznym;
- Absorpcyjność próbki nie zmienia się wraz ze zmianą koncentracji jej składników;
- Analiza odbywa się przy stałej temperaturze próbki i stałym jej ciśnieniu;
- Stopień absorpcji promieniowania podczerwonego we wszystkich zakresach długości fali jest wprost proporcjonalny do ilości cząsteczek absorbujących promieniowanie w próbce. Jest to zależność liniowa, dlatego, wieloskładnikowa analiza ilościowa mieszaniny gazów jest możliwa.

Podstawowe elementy analizatora GASMET zaprezentowano na ilustracji (Rysunek 5).



Rysunek 5 Budowa wewnętrzna analizatora Gasmet typ DX 4000

gdzie:
1 – źródło promieniowania;
2 – interferometr;
3 – ogrzewana cela pomiarowa;
4 – detektor promieniowania;
5 – elektroniczny układ do wstępnej obróbki sygnału.

Analizator Gasmet jest narzędziem do pomiarów stężenia zanieczyszczeń w wilgotnych i korozyjnych gazach. Długość drogi pomiarowej w celi dobierana jest w zależności od przewidywanych zastosowań, czyli rodzajów składników i zakresu stężeń mierzonych gazów. Jest to wielkość ustawiana w autoryzowanym punkcie serwisowym. Poza przyrządem pomiarowym układ jest wyposażony w rozbudowane oprogramowanie CALCMET przystosowane do współpracy z przenośnym komputerem. Oprogramowanie CALCMET, pracujące na platformie Windows, zawiera odpowiednie algorytmy pozwalające na wyznaczanie stężeń różnych składników w wieloskładnikowej mieszaninie gazów. Referencyjne spektra różnych gazów, potrzebne w analizie składu gazu, znajdują się zapisane w pamięci komputera i są łatwo dostępne ze wspomnianej biblioteki.

Oprogramowanie przyrządu wykorzystuje szybką transformację Fouriera (FFT – Fast Fourier Transform) dla wyznaczania spektrum z interferogramu. Widmo absorpcji jest określane z widma promieniowania, które przeszło przez próbkę, czyli z widma transmitancji. Przed przystąpieniem do realizacji pomiarów z wykorzystaniem opisywanego zestawu, wykonano kilka czynności przygotowawczych tj. m.in.:

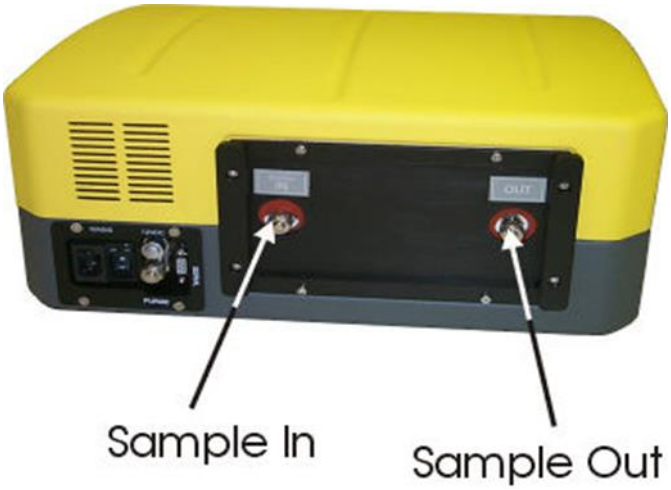
- Dokonano podłączenia i połączenia poszczególnych elementów zestawu pomiarowego;
- Wygrzano tor pomiarowy;
- Wykonano kalibrację zera azotem, zgodnie z zapisami instrukcji obsługi analizatora.

Analizowany gaz przepływa kolejno przez poszczególne elementy zestawu pomiarowego tj.:

- Lanca pomiarowa;
- Grzana sonda pomiarowa;
- Grzany wąż doprowadzający spaliny do kondycjonera;
- Kondycjoner spalin, w którym znajduje się pompa i filtr;
- Grzany wąż doprowadzający spaliny z kondycjonera do właściwego analizatora spalin;
- Właściwy analizator spalin Gasmet.

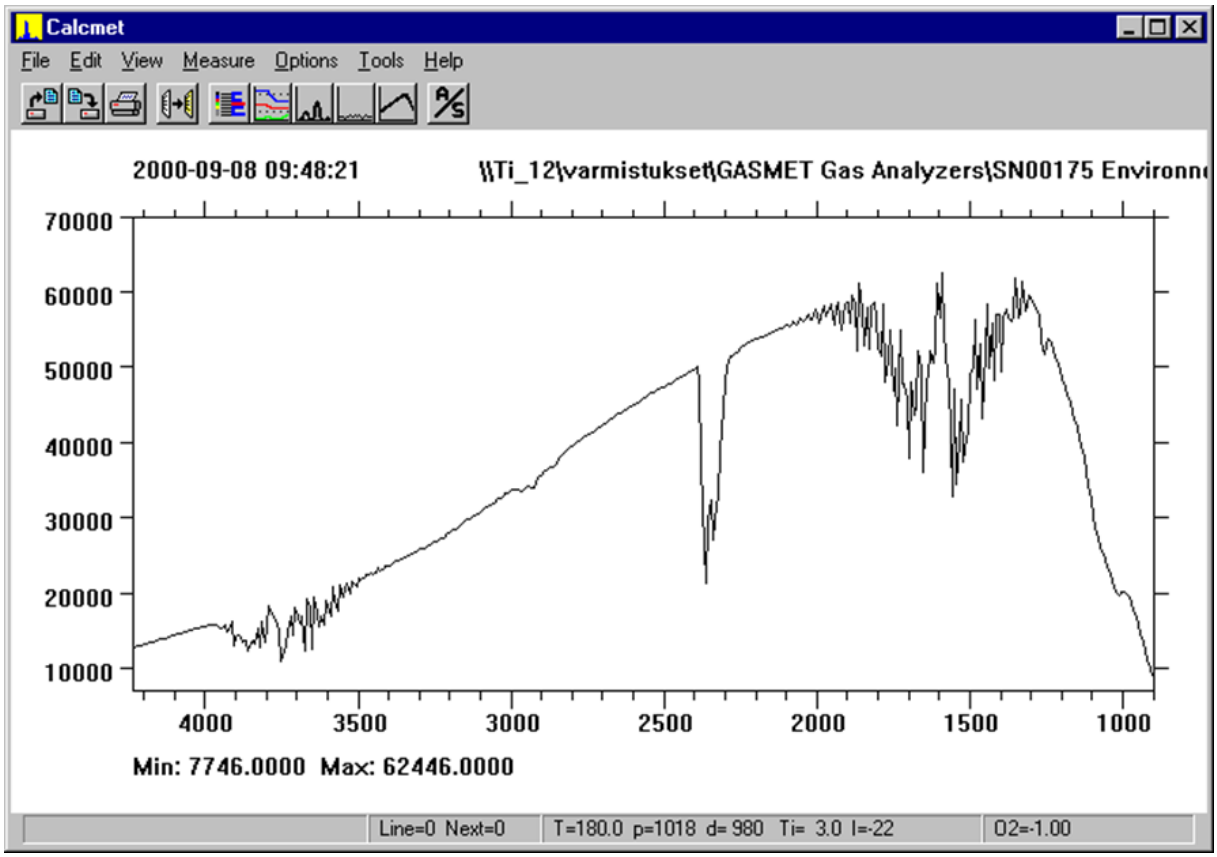
Aby zaprezentowany przepływ analizowanego gazu był możliwy, wszystkie elementy zestawu pomiarowego muszą zostać połączone ze sobą w odpowiedni sposób. Jak już wcześniej wspomniano, kluczowym elementem zestawu jest analizator właściwy tj. Gasmet.

Na jednym z boków obudowy analizatora Gasmet znajdują się wszystkie wymagane podłączenia, czyli: zasilanie (230 V) wraz z przełącznikiem załącz/wyłącz, wyjście do zewnętrznego komputera (RS 232), podłączenia gazu do płukania celi pomiarowej (purge) oraz podłączenie gazu wlotowego (sample in) i wylot próbki gazowej (sample out). Króćce przyłączeniowe analizatora przedstawiono na ilustracji (Rysunek 6).



Rysunek 6 Widok króćców przyłączeniowych analizatora GASMET serii DX, Sample In – wejście próbki; Sample Out – wylot gazu

Przed każdym pomiarem właściwym należy zarejestrować widmo tła, czyli azotu. Typowe widmo przedstawiono na ilustracji (Rysunek 7).



Rysunek 7 Typowe widmo tła dla azotu

Spektrum dla gazu zerowego jest używane podczas pomiarów jako poziom odniesienia, z którym porównywane są wyniki otrzymane podczas pomiaru dla próbki gazu.

W normalnych warunkach w spektrum tym widać pik absorpcji dla długości fali 2350 cm^{-1}, jako efekt obecności CO_2 w ścieżce pomiarowej. Mniejsze piki absorpcji w zakresie od 1300 do 1800 cm^{-1} są efektem obecności pary wodnej.

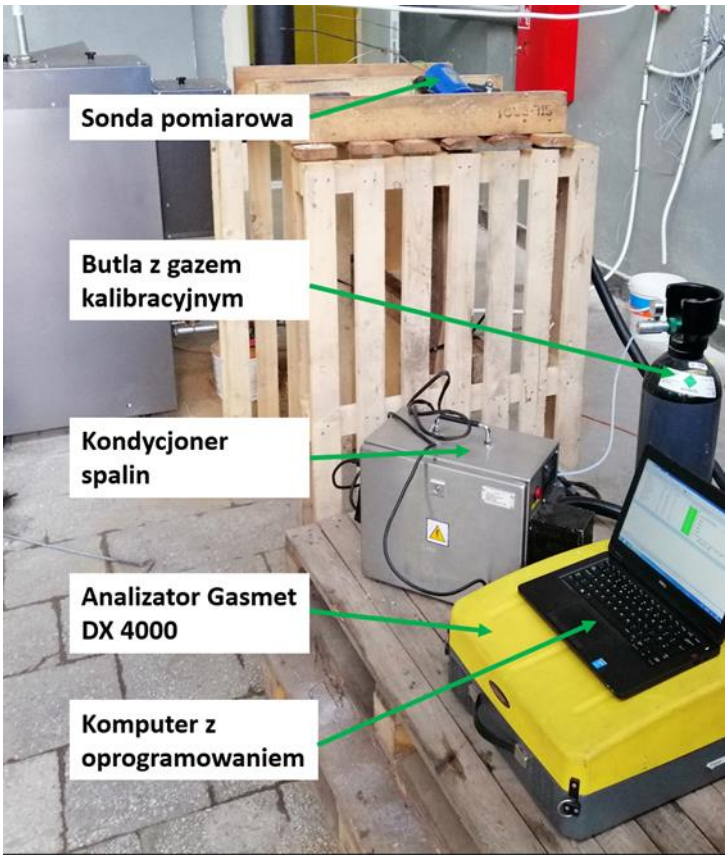
Istniejące oprogramowanie pozwalana na wykonywanie tak pojedynczych pomiarów jak i serii pomiarowych, przy czym można ustalić częstotliwość wykonywania pomiarów. Wyniki pomiarów są automatycznie zapisywane w plikach przez oprogramowanie. Można je następnie analizować, korzystając ze wspomnianego oprogramowania CALCMET lub zapisać w postaci tekstowej i opracowywać w arkuszach kalkulacyjnych np. programu Excel.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane techniczne wykorzystywanego w czasie pomiarów analizatora.

Tabela 1 Charakterystyka analizatora GASMET

Dane ogólne	
Sposób pomiaru	FT-IR (szybka transformacja Fouriera w podczerwieni)
Wykonanie	równoległa analiza do 50 składników gazowych w próbce
Temperatura pomieszczenia	optymalnie +20+/-2°C; dopuszczalne 15-25°C – bez kondensacji
Temperatura przechowywania	-20°C +60°C, bez kondensacji
Zasilanie	12V DC lub 100-240 V AC /50-60 Hz
Spektrometr	
Interferometr	TEMET
Rozdzielczość	8 cm^{-1} lub 4 cm^{-1}
Częstotliwość skanowania	10 widm/s
Detektor promieniowania	termo-elektryczny MCT lub DTGS
Źródło promieniowania podczerwonego	ceramiczne, SiC, temperatura 1550 K
Materiał okna	BaF_2 lub ZnSe
Zakres widma fal	900 – 4200 cm-1 dla zestawu BaF2/MCT, 700 – 4200 cm-1 dla zestawu ZnSe/DTGS
Cela pomiarowa	
Materiał	100 % złoto lub rod pokrywające aluminium
Lustra	stałe, pokryte złotem
Objętość celi pomiarowej	dla kilkakrotnego przejścia 0,22 l lub 1,07 l, dla jednokrotnego przejścia 0,013 l lub 0,031 l
Uszczelki	Teflon pokryty Vitonem lub Kaltrez w formie O-ringów
Temperatura	180°C, maximum
Maksymalne ciśnienie próbki gazowej	2 bary
Przepływ badanego gazu	1-5 l/min
Czas odpowiedzi	<60 s
Wymagany filtr gazu	2 µm
Postać próbki	niekondensująca
Parametry pomiaru	
Kalibracja punktu zerowego	24 godzinna kalibracja azotem o czystości min. 4,0 (zalecany 5,0)
Dryft punktu zerowego	2 % najniższego zakresu pomiarowego
Dryft czułości	brak
Odchylenie liniowe	2% najniższego zakresu pomiarowego
Dryft temperaturowy	2% najniższego zakresu pomiarowego przy zmianie temperatury o 10°C
Wpływ zmian ciśnienia	1% zmiana wartości mierzonej przy 1% zmianie ciśnienia próbki
Dane dla gazu wlotowego i wylotowego	
Temperatura gazu wlotowego	niewywołująca kondensacji składników, temperatura gazu równa temperaturze celi pomiarowej
Pompa dla gazu mierzonego	zewnętrzna
Przepływ gazu	140 l/h
Oczyszczanie gazu mierzonego	filtracja na filtrze 2 µm jest wymagana
Ciśnienie gazu mierzonego	ciśnienie atmosferyczne

Widok zestawu analizatora Gasmet DX 4000 na stanowisku badawczym zaprezentowano na ilustracji (Rysunek 8).

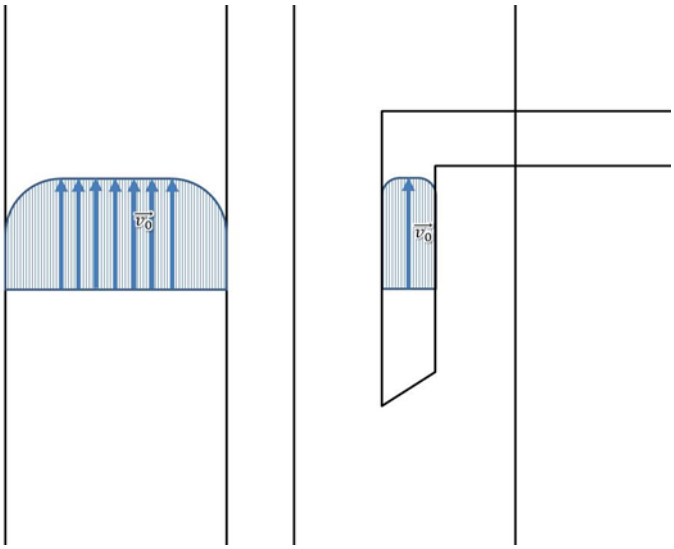


Rysunek 8 Analizator gazów GASMET na stanowisku badawczym w trakcie opisywanych pomiarów

3.2. Metoda poboru próbek pyłu i analizy składu chemicznego pyłów

3.2.1. Przygotowanie filtrów i pobór próbek pyłu do badania

Do poboru pyłu wybrano filtry membranowe GE Healthcare Whatmann™ o średnicy 47 mm oraz odpowiednią dyszę połączoną z pobornikiem firmy Derenda, umożliwiające pobór pyłu całkowitego (TSP) ze strumienia emisyjnego w kominie odprowadzającym spaliny z kotła stanowiącego element stanowiska badawczego. Próbki były zbierane w sposób zgodny z normami ISO 9096:2017 oraz Metodą 5 (Determination of particulate matter emissions from stationary source) opracowaną przez Air Emission Measurement Center należące do Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (U.S. Environmental Protection Agency – EPA). Próbki były pobierane w sposób izokinetyczny – najpierw została określona prędkość spalin w kominie, w jego środku. Następnie w środku komina umieszczono dyszę pobierającą w taki sposób aby spaliny wpływały do tej dyszy. W kolejnym kroku umieszczono w kominie dyszę pobierającą, dokładnie w środku komina. Dysza została umieszczona równolegle, a natężenie przepływu pobornika pyłu zostało tak ustalone aby prędkość przepływu gazu w dyszy była równa prędkości przepływu bez ingerencji dyszą (Rysunek 9). Wszystkie elementy wykorzystane w eksperymencie zostały przygotowane zgodnie ze odpowiednimi standardami czystości, a każdy element który miał bezpośredni kontakt z filtrami był czyszczony w myjce ultradźwiękowej.



Rysunek 9 Schemat poboru izokinetycznego z zachowaniem tej samej prędkości gazu v_0

Przed wykonaniem badania filtry poddano procesowi kondycjonowania, wykonanego w pokoju wagowym, w kabinie laminarnej, w stałych warunkach temperatury i wilgotności, przez minimum 48 godzin. Przed rozpoczęciem pomiaru grawimetrycznego waga została skalibrowana, a przed każdym odrębnym ważeniem filtru nieobciążonego – wyzerowana. Każdy filtr został zważony za pomocą odpowiednio dobranej wagi analitycznej. Filtry były ważone dwukrotnie, zgodnie z „Instrukcją obsługi wagi", z odstępem przynajmniej 12-godzinnym, w celu potwierdzenia stabilności masy filtra. Filtry po ekspozycji także kondycjonowano w pokoju wagowym, w kabinie laminarnej, przez minimum 48 godzin, w stałych warunkach temperatury i wilgotności. Filtry również były ważone dwukrotnie, zgodnie z „Instrukcją obsługi wagi", z odstępem wynoszącym od 24 do 72 godzin, w celu potwierdzenia stabilności masy filtra. Masa filtra obciążonego wyrażona została jako wartość średnia z dwóch odrębnych pomiarów. Odczyt średni masy stanowi wagę końcową filtra.

Stężenie pyłu (C) obliczane jest jako iloraz różnicy masy filtra obciążonego (m_k) i filtra nieobciążonego (m_p) oraz objętości powietrza zassanego przez pobornik w trakcie pobierania próbki (V) według równania:

$$C = \frac{m_k - m_p}{V}$$

Wyniki pomiarów wyrażane są w mg/m^3, gdzie objętość powietrza jest objętością gzów spalinowych pobraną w danym czasie próbkowania.

3.2.2. Analiza zawartości wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w pyle całkowitym

W celu wyizolowania WWA zaadsorbowanych na filtrach zastosowano dwuetapową ekstrakcję. Próbkę filtra przeniesiono do szklanego naczynia, dodano wzorzec wewnętrzny (mieszanina sześciu deuterowanych WWA) a następnie trzykrotnie ekstrahowano na łaźni ultradźwiękowej za pomocą chlorku metylenu (3x30 ml, 20 min). Uzyskane ekstrakty połączono, przesączono przez sączek twardy, a następnie zatężono do objętości 1 ml pod zmniejszonym ciśnieniem.

Uzyskany roztwór poddano analizie na zawartość WWA za pomocą techniki chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrem mas (GC-MS QP-2010 Plus Shimadzu). Dozownik typu split/splitless (280°C), split = 10; gaz nośny: hel; kolumna kapilarna ZB-5MS 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm;

program temperaturowy: 80°C (1 min) – 8°C/min – 280°C (9 min). Tryb pracy spektrometru mas: jonizacja elektronowa, SIM. Oznaczeniu podlegały następujące związki: naftalen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, piren, benzo(a)antracen, chryzen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)piren, dibenzo(a,h)antracen, benzo(g,h,i)perylen oraz indeno(1,2,3-c,d)piren.

Granica oznaczalności zastosowanej metody wynosi dla każdego związku z grupy WWA 5 ng.

3.2.3. Analiza zawartości wybranych metali w pyle zawieszonym

Przed analizą, próbki pyłu roztwarzane były w mineralizatorze mikrofalowym, w mieszaninie wody destylowanej (5 ml) i spektralnie czystych odczynnikach: 65% kwasie azotowym (10 ml) i 30% nadtlenku wodoru (3 ml) (zgodnie z normą PN-EN 14902:2010). Po zakończeniu mineralizacji, naczynia były chłodzone przez około 30-60 min w zimnej wodzie. Następnie naczynia były otwierane, a roztwory próbek przenoszone ilościowo z użyciem mikroporowych filtrów strzykawkowych (PES) do oznaczonych kolbek pomiarowych o objętości 50 ml. Nieroztworzone pozostałości filtrów przemywane były wodą destylowaną, którą również przesączano do kolbek. Tak przygotowane próbki trafiały do analizy.

W mineralizatach oznaczone zostały zawartości wybranych metali z wykorzystaniem techniki ICP-MS. W całej procedurze stosowane były certyfikowane wzorce kalibracyjne, gazy, kwasy i inne odczynniki o wysokiej czystości (suprapur) oraz certyfikowane materiały odniesienia (pył miejski i/lub drogowy firmy NIST). Wykorzystywane one były zarówno w samym toku analiz, jak też w procesie weryfikowania poprawności oznaczeń.

Zawartość wybranych metali w próbkach pyłu pobranych na filtry oznaczana była z wykorzystaniem techniki emisyjnej spektrometrii mas sprzężonej z plazmą wzbudzaną indukcyjnie ICP-MS (ang. inductively coupled plasma-mass spectrometry).

Analizy prowadzone zostały zgodnie z parametrami, które określają normy: PN-EN 14902:2006, PN-Z-04434:2011, PN-EN ISO 11885:2009, PN-85/Z-04102/03, PN-Z-04291:2003, PN-79/Z-04125.02, PN-Z-04106-3:2002P, PN-Z-04124-5:2006, PN-ISO 8518:1994, PN-EN-13656:2006, PN-ISO-11047:2001, PN-EN-14385:2005. Oznaczenia przeprowadzone były z wykorzystaniem aparatu ICP-MS (Elan 6100 DRC-e Perkin Elmer). Każda próbka mierzona była trzykrotnie. W kalibracji używano wielopierwiastkowego wzorca w postaci roztworu: Periodic table mix 1 and Transition metal mix 2 (Fluka).

Metodę weryfikowano z użyciem wzorców SRM 1643e (odzysk wzorca był w granicach 95%(Ni)-116%(Cr)) i SRM 1648a (odzysk: 75%(As)-127%(Cr)). Limity detekcji metody są następujące:

V	1,5 ng
Mn	7,5 ng
Co	1,5 ng
Ni	3,0 ng
Cu	3,0 ng
As	3,0 ng
Rb	1,5 ng
Cd	0,6 ng
Pb	4,2 ng
Ga	1,5 ng

Cr	1,5 ng
Mo	1,5 ng
Mg	30,0 ng
Ti	7,5 ng

3.3. Metoda prowadzenia procesu badawczego

Badania stanowiskowe prowadzono w okresie od listopada do grudnia 2020 roku. Rozpalanie kotła następowało 3-4 godziny przed przystąpieniem do realizacji danej serii pomiarowej. Kocioł przez cały okres tj. poprzedzający daną sesję pomiarową oraz w jej trakcie pracował na niezmiennych nastawach w zakresie zadanej temperatury wody obiegowej (na wyjściu). Poszczególne serie pomiarowe różniły się między sobą wartością tego parametru. Drugim kluczowym parametrem zmienianym dla poszczególnych serii pomiarowych był stopień przymknięcia przegrody po stronie ssawnej wentylatora powietrza.

Inne parametry pracy kotła takie jak:

- Czas podawania paliwa;
- Czas przerwy w podawaniu paliwa;
- Obroty wentylatora spalin;

dobierane były przez sterownik kotła w sposób automatyczny.

Czas prowadzenia pomiarów dla danej serii pomiarowej wynosił minimum 1,5 godziny. W czasie każdej serii pomiarowej dokonywano:

- Ciągłego próbkowania spalin celem analizy ich składu (substancji gazowych). Czas uśredniania wyników na analizatorze został ustawiony na 20 s;
- Odczytu temperatur:
    - Spalin;
    - Powietrza (otoczenia, tj. temperatury powietrza w miejscu lokalizacji kotła);
    - Wody na wyjściu z kotła (na zasilaniu);
    - Wody na powrocie do kotła;
- Odczytu przepływu wody obiegowej;
- Odczytu aktualnych parametrów operacyjnych kotła podawanych na jego panelu sterowniczym takich jak:
    - Czas podawania paliwa;
    - Czas przerwy w podawaniu paliwa;

Pomiary parametrów emisyjnych archiwizowane były w sposób automatyczny z podstawą czasu 20 s. Archiwizacji pozostałych parametrów dokonywano poprzez ich odczyt z miejscowych przyrządów pomiarowych oraz zapis z podstawą czasu 5 minut.

W sumie zrealizowano 6 serii pomiarowych równocześnie, w trakcie tych samych 6 serii pomiarowych dokonywano poboru próbek pyłu całkowitego w strumieniu emisyjnym. W ramach każdej z serii pomiarowych pobrano 4 próbki pyłu. Szczegółowe wyniki uzyskane w czasie poszczególnych serii pomiarowych, zarówno w odniesieniu do parametrów emisyjnych, jak i operacyjnych przedstawiono i omówiono szczegółowo w kolejnych rozdziałach (w szczególności rozdział 5 i rozdział 6).

Należy podkreślić, że planując a następnie realizując proces badawczy dochowano wszelkiej staranności, aby jak najlepiej odzwierciedlić w trakcie badania rzeczywiste warunki, w jakich dokonuje się spalania paliw w kotłach na ekogroszek, jak również aby jak najdokładniej wykonać wszelkie analizy przewidziane w ramach opisywanego badania.

3.4. Pomiary uzupełniające

3.4.1. Pomiar z zastosowaniem kamery termowizyjnej

Uzupełniającym elementem stanowiska była również kamera termowizyjna, przy pomocy której określano rozkład temperatury na powierzchni bocznej kotła w czasie jego pracy. Wiedza ta jest potrzebna do analizy strat cieplnych kotła do otoczenia.

Kamera termowizyjna jest najbardziej zaawansowanym instrumentem termograficznym. Pomiary termowizyjne polegają na pomiarze natężenia promieniowania cieplnego, które jest emitowane przez wszystkie ciała o temperaturze wyższej od temperatury 0K (-273,15°C). Promieniowanie cieplne może być emitowane przez bryłę (warstwa) aktywnego radiacyjnie gazu, powierzchnię cieczy lub zbiorowisko kropel cieczy, powierzchnię ciała stałego lub zbiór tych obiektów w obserwowanej przestrzeni. Za wyjątkiem gazów, we wszystkich wymienionych wyżej przypadkach, promieniowanie cieplne ma charakter widma ciągłego (emitowane promieniowanie zawiera teoretycznie wszystkie długości fali promieniowania od zera do nieskończoności).

Wykorzystywana w czasie pomiarów kamera termowizyjna to model FLIR E8-XT. Jest to jeden z najbardziej zaawansowanych instrumentów pomiarowych firmy FLIR. Sprzęt wyposażono w detektor o bardzo dużej rozdzielczości 320x240 pikseli, który pozwala rejestrować z dużą dokładnością rozkład temperatur i precyzyjnie identyfikować miejsca o zaburzonej aktywności termicznej. Dzięki zastosowaniu szerokokątnego obiektywu kamera dobrze sprawdza się w ciasnych zakamarkach i w zaułkach przeróżnych instalacji. Duże pole widzenia to mniejsza liczba termogramów do zobrazowania całości badanego elementu. Kamera charakteryzuje się szerokim zakresem rejestrowanych temperatur, co pozwala wykorzystywać ją w różnego rodzaju zadaniach pomiarowych. Widok kamery FLIR E8-XT przedstawiono na ilustracji (Rysunek 10).

Rysunek 10 Widok kamery termowizyjnej FLIR E8-XT użytej podczas badań

Podstawowe parametry kamery termowizyjnej użytej do badań to:

- Rozdzielczość detektora 320x240 pikseli;
- Czułość temperaturowa <0,06°C;
- Zakres temperatur -20 – +550°C;
- Pole widzenia 45x34°;
- Masa 0,58 kg.

3.4.2. Pomiar stężenia zanieczyszczeń pyłowych we wnętrzu pomieszczenia

Uzupełnieniem analiz zawartości gazowych i pyłowych składników zanieczyszczających, jakie są odprowadzane z paleniska do powietrza atmosferycznego był również pomiar stężenia pyłu we wnętrzu pomieszczenia, w którym został zlokalizowany kocioł węglowy. Celem tego badania było oszacowanie, na ile użytkowanie kotła węglowego może powodować zwiększone stężenia pyłu w pomieszczeniach zamkniętych, czego efektem może być niekorzystny wpływ na zdrowie osób przebywających (w szczególności długotrwale) w budynkach (a zwłaszcza w pomieszczeniach służących jako kotłownie), w których do celów ogrzewania pomieszczeń stosuje się tego typu kotły.

W tym przypadku analizowano w trakcie trwania badania stężenia frakcji $PM_{2,5}$ pyłu zawieszonego, ze względu na szczególnie niekorzystny wpływ na zdrowie pyłów bardzo drobnych. Nieco szerszy opis skutków zdrowotnych wynikających z narażenia na te zanieczyszczenia znajduje się w rozdziale 11.4 niniejszego opracowania. Jednocześnie, w celach porównawczych, stężenia pyłu $PM_{2,5}$ mierzono na zewnątrz pomieszczenia, tj. w powietrzu atmosferycznym.

Do pomiarów ciągłych stężenia pyłu zawieszonego $PM_{2,5}$ zastosowano pyłomierz SidePak AM510 Personal Aerosol Monitor firmy TSI Inc. Pyłomierz SidePak AM510 (Rysunek 11) w celu określenia stężenia masowego wybranej frakcji pyłu wykorzystuje technologię rozpraszania światła. Za pomocą zamontowanej w urządzeniu pompki automatycznej ciągły strumień powietrza wraz z

aerozolem wprowadzany jest do komory pomiarowej. Prędkość przepływu powietrza przez aparat wynosi 1,7 dm^3/min.

Rysunek 11 Widok pyłomierza SidePak AM510 wykorzystanego w trakcie badań

4. Wyniki analiz dotyczących paliwa

4.1. Wyniki analiz dla węgla Ekogroszek [XXX]

Paliwem wykorzystanym do realizacji badań na opisanym wcześniej stanowisku był węgiel [XXX]. Paliwo to było podstawowym paliwem, które było poddane badaniom w ramach opisanych w niniejszym opracowaniu badań. Wyniki badań tego paliwa zrealizowano w 4 seriach pomiarowych, których wyniki zostały przedstawione w dalszej części opracowania (rozdziały 5.1.1.-5.1.4.). Zgodnie z informacjami zamieszonymi na stronie internetowej producenta, paliwo to charakteryzuje się następującymi parametrami:

- Granulacja: 5-31,5 mm;
- Wartość opałowa: 26-28 MJ/kg;
- Zawartość popiołu: max 7%;
- Zawartość siarki: max 0,6%;
- Zawartość wilgoci: max 15%;
- Udział podziarna: max 10%.

W celu oceny parametrów wykorzystywanego paliwa pobrano jego próbkę oraz skierowano do badań w Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki. Laboratorium to posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (zakres akredytacji nr AB 1420). Gwarancję wysokiej wiarygodności i rzetelności wykonywanych usług daje wdrożony i stale doskonalony system zarządzania zgodny z normą PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02, profesjonalny zespół i nowoczesna aparatura.

Wybrane wyniki zestawiono w poniższej tabeli (Tabela 2), zaś szczegółowe sprawozdanie z wykonanych badań (LBAP/58/2020) przedstawiono w załączniku 1.

Tabela 2 Wyniki analizy parametrów roboczych charakteryzujących badane paliwo – Ekogroszek [XXX]

Parametr w stanie roboczym	Jednostka	Wartość	Niepewność pomiaru

Wilgoć całkowita	%	4,8	0,6
Popiół	%	14,8	0,4
Części lotne	%	32,55	1,36
Ciepło spalania	kJ/kg	25 334	273
Wartość opałowa	kJ/kg	24 304	484
Zawartość węgla	%	63,5	4,6
Zawartość wodoru	%	4,18	0,47
Zawartość azotu	%	1,71	0,28
Zawartość siarki całkowitej	%	0,62	0,11

Wynik wykonanego badania wskazuje, że wykorzystywane w trakcie pomiarów paliwo charakteryzuje się w stosunku do parametrów deklarowanych:

- Ponad dwukrotnie wyższą zawartością popiołu;
- Niższą prawie o 2 MJ/kg wartością opałową od dolnej deklarowanej wartości (tj. 26 Mj/kg);
- Znacząco niższą od maksymalnej deklarowanej wilgotnością;
- Zbliżoną do deklarowanej wartości zawartością siarki.

Uwagę należy przede wszystkim zwrócić na wysoką zawartość popiołu w tym węglu znacznie przekraczającą wartość deklarowaną przez producenta. Skutkiem wysokiej zawartości popiołu, stanowiącej niepalną frakcję mineralną, jest m.in. obniżenie wartości opałowej samego paliwa (co zresztą również widać po wynikach jego analizy), a w efekcie zmniejszona sprawność procesu spalania. W skutek tego z tej samej ilości paliwa uzyskiwana jest mniejsza ilość energii, aniżeli można się było tego spodziewać. W wyniku wysokiej zawartości popiołu w paliwie rosnąć mogą również stężenia pyłu emitowanego do powietrza.

4.2. Wyniki analiz dla węgla Ekogroszek [YYY]

Dodatkowym paliwem wykorzystanym do realizacji badań na opisanym wcześniej stanowisku był węgiel Ekogroszek [YYY]. Wyniki badań tego paliwa z kolei zrealizowano w 2 seriach pomiarowych, których wyniki zostały zamieszczone w rozdziałach 5.1.5.-5.1.6. Zgodnie z informacjami zamieszonymi na stronie internetowej producenta, paliwo to charakteryzuje się następującymi parametrami:

- Granulacja: 5-25 mm;
- Wartość opałowa: 26 MJ/kg;
- Zawartość popiołu: max 10%;

W celu oceny parametrów wykorzystywanego paliwa ponownie pobrano jego próbkę oraz skierowano do badań w Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki.

Wybrane wyniki zestawiono w poniższej tabeli (Tabela 3), zaś szczegółowe sprawozdanie z wykonanych badań (LBAP/59/2020) przedstawiono w załączniku 2.

Tabela 3 Wyniki analizy parametrów roboczych charakteryzujących badane paliwo – Ekogroszek [YYY]

Parametr w stanie roboczym	Jednostka	Wartość	Niepewność pomiaru

Wilgoć całkowita	%	10,3	0,8
Popiół	%	5,8	0,3
Części lotne	%	33,67	1,31
Ciepło spalania	kJ/kg	26 421	322
Wartość opałowa	kJ/kg	25 218	510
Zawartość węgla	%	66,9	4,8
Zawartość wodoru	%	4,36	0,48
Zawartość azotu	%	1,84	0,29
Zawartość siarki całkowitej	%	0,21	0,06

Wynik wykonanego badania wskazuje, że wykorzystywane w trakcie pomiarów paliwo charakteryzuje się zgodnymi z deklarowanymi parametrami w tym stosunkowo niską zawartością popiołu i siarki.

5. Wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń w strumieniu spalin

W trakcie realizacji badań wykonano 4 serie pomiarowe, zgodnie z metodą, o której była mowa w rozdziale 3 niniejszego opracowania. Podczas badań rejestrowane były przebiegi stężeń w funkcji czasu, dotyczące wybranych związków chemicznych (zanieczyszczeń) w spalinach. Dane były uśredniane dla okresów 20 s i zapisywane do plików tekstowych. Podczas pomiaru korzystano z dedykowanego oprogramowania Calcmet. Dla większej przejrzystości prezentacji wyników, uzyskane stężenia przedstawiono w formie tabelarycznej jako średnie 10-minutowe. W raporcie zamieszczono również przebiegi czasowe stężeń poszczególnych zanieczyszczeń gazowych (w formie wykresów). Ponieważ zgodnie z normą PN-EN 303-5:2012 dla analizowanego źródła limity emisji są wyznaczane dla spalin suchych, zawierających 10% tlenu, uzyskane wyniki przeliczono na warunki normowe. Prezentowane wyniki odnoszą się do tych warunków.

5.1. Wyniki pomiarów stężeń substancji gazowych

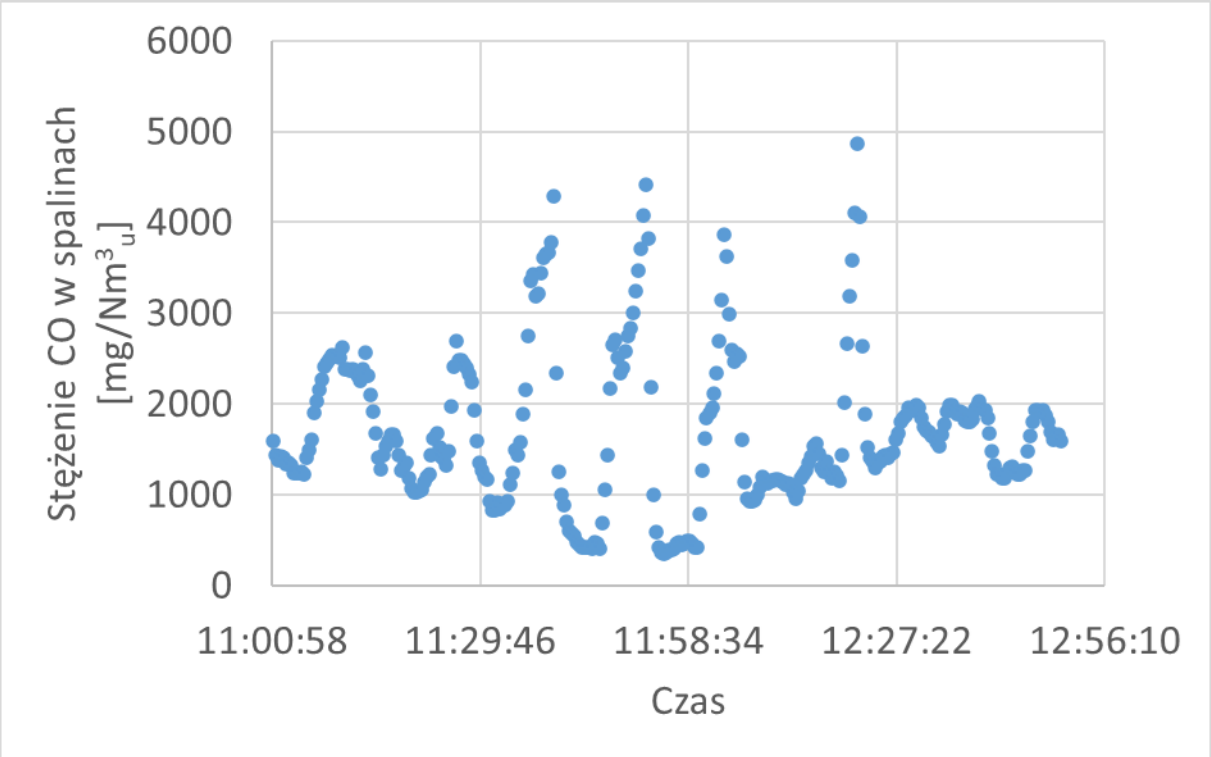
5.1.1. Pierwsza seria pomiarowa

Pomiary w serii 1 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 9,76 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej wyniosła 3,5. Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunkach 12-16. Wybrane dodatkowe ilustracje zamieszczono w załączniku 5 (rysunki 50-52).

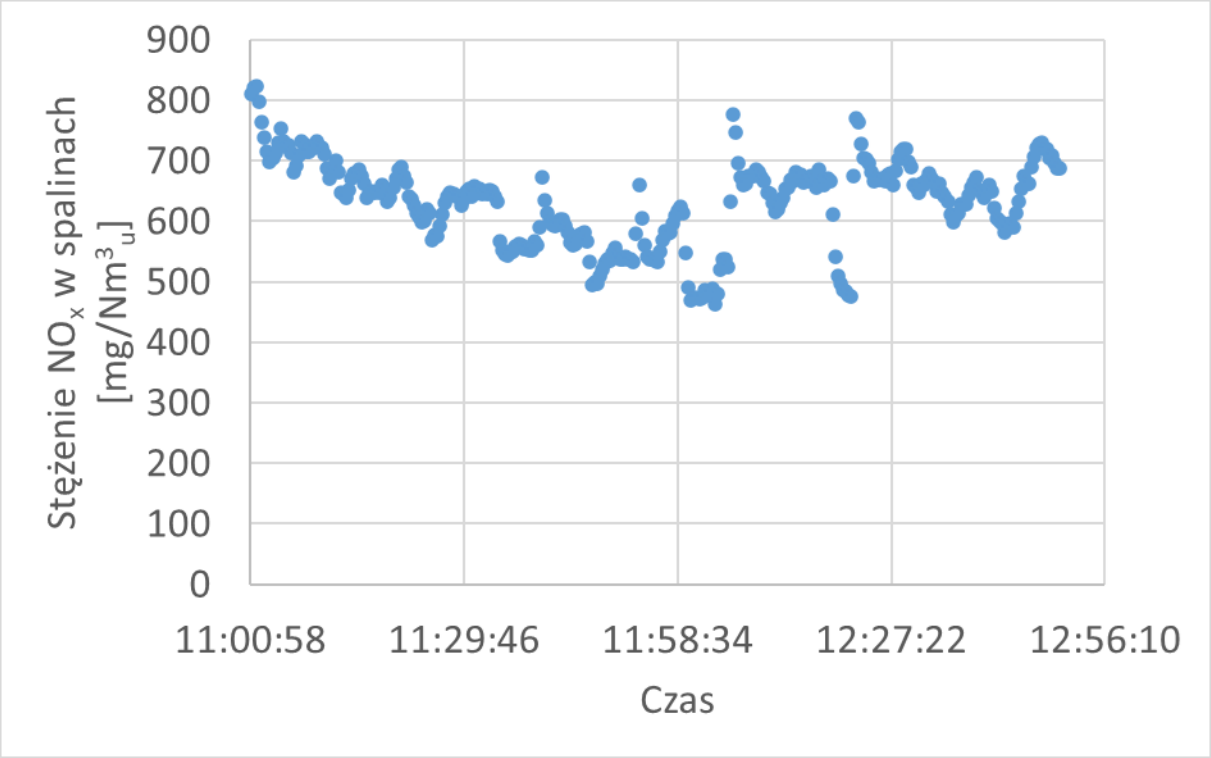
Tabela 4 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w pierwszej serii pomiarowej

Czas	**CO**	**N_2O**	**NO**	**NO_2**	**SO_2**	**NH_3**	**HCl**	**HF**	**CH_4**
	mg/m³								
0:00	1761,36	23,70	483,50	0,88	276,97	1,96	0,24	0,05	42,07
0:10	1844,26	25,05	431,37	5,24	306,61	1,77	0,98	0,05	24,63

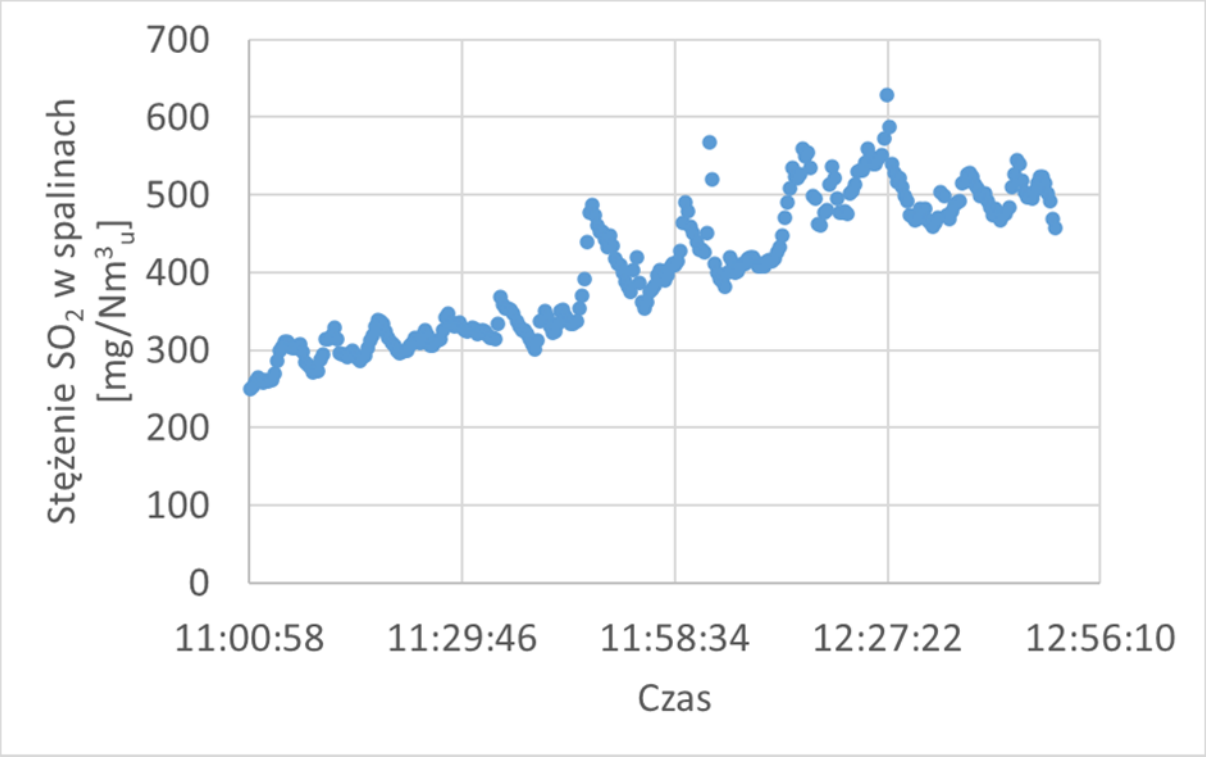
0:20	1647,59	24,24	401,47	14,82	318,15	0,98	1,90	0,27	20,08
0:30	2052,81	35,68	383,47	7,44	330,94	0,56	1,81	0,15	62,16
0:40	1656,93	28,99	356,27	5,67	396,54	0,56	4,27	0,36	51,40
0:50	1177,35	23,76	353,38	4,72	412,16	0,87	5,45	0,41	18,64
1:00	1602,03	26,20	400,73	14,38	422,07	1,07	4,73	0,54	16,23
1:10	1891,06	24,50	405,51	16,24	508,93	1,26	2,22	0,31	14,07
1:20	1682,06	21,80	425,01	22,76	512,58	1,44	2,69	0,40	9,30
1:30	1596,72	20,64	395,74	21,13	498,46	1,15	2,40	0,39	15,31
1:40	1749,00	22,40	443,29	22,32	500,82	0,98	2,54	0,36	16,73
średnia	**1693,58**	**25,33**	**405,16**	**11,85**	**403,31**	**1,15**	**2,67**	**0,30**	**26,86**



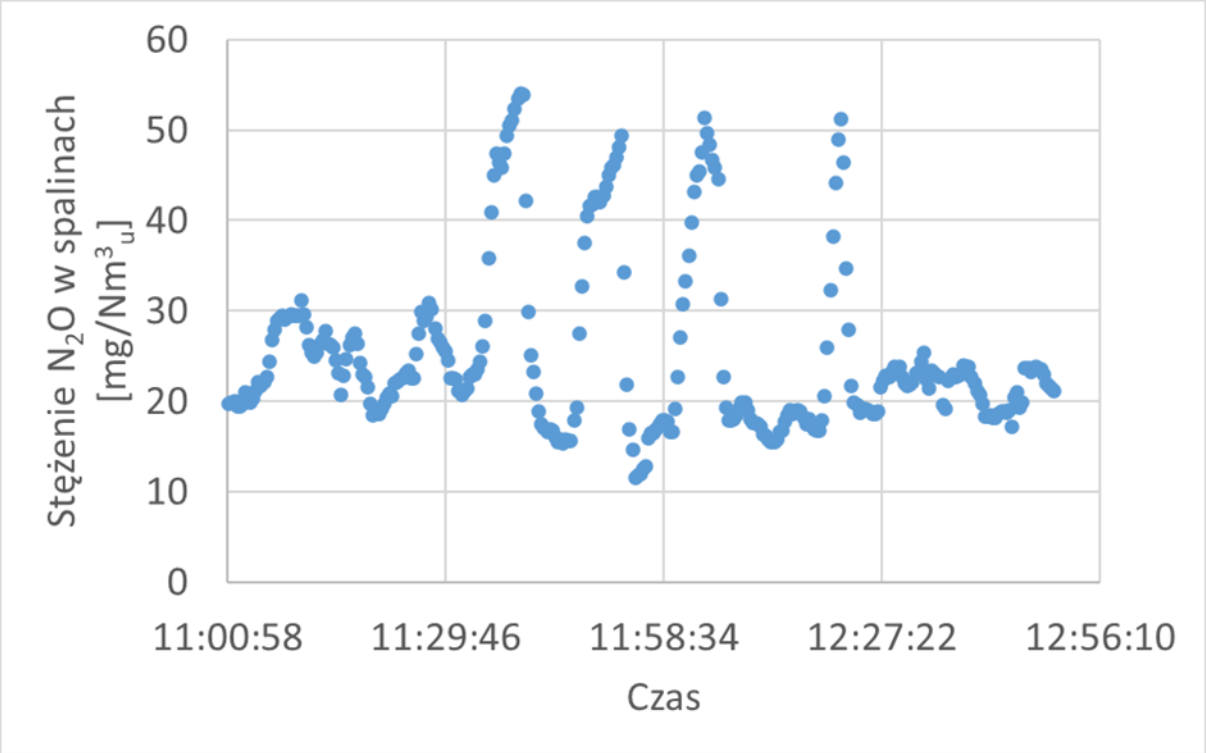
Rysunek 12 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



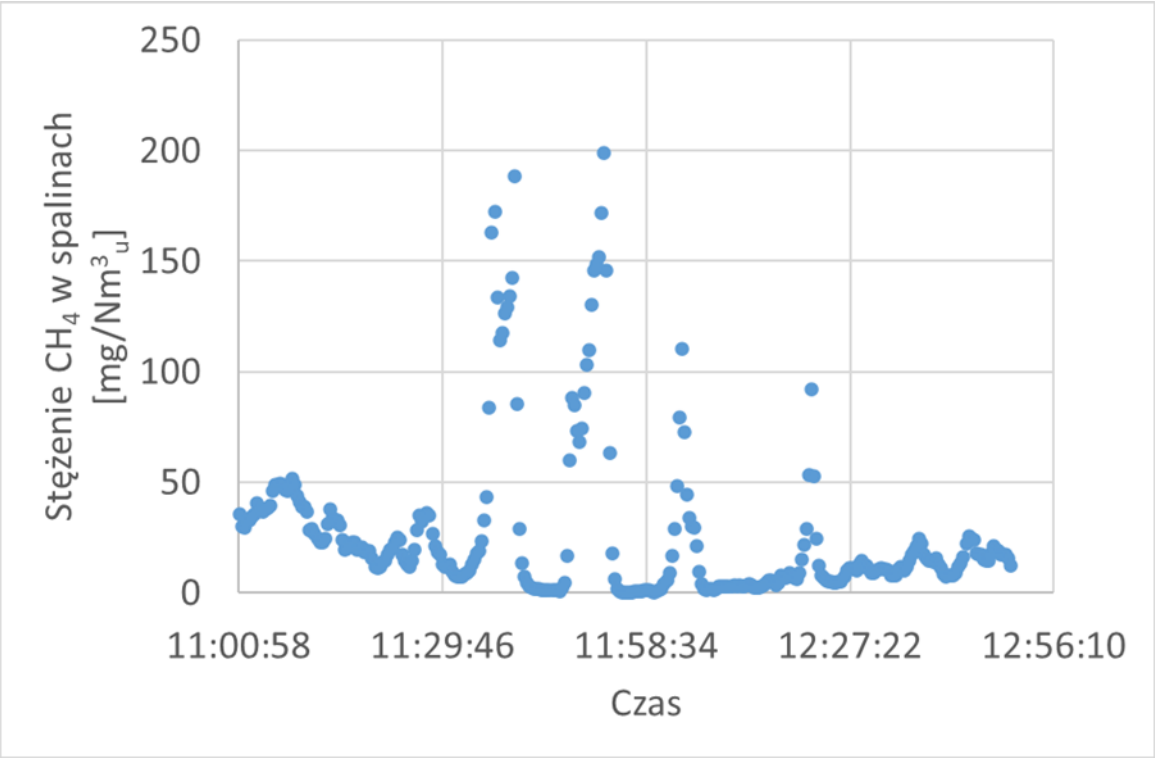
Rysunek 13 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



Rysunek 14 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



Rysunek 15 Stężenie N_2O w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



Rysunek 16 Stężenie CH_4 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej

Uzyskane wyniki, szczególnie w zakresie stężeń gazów, których obecność powiązana jest z jakością procesu spalania (CO, CH_4), wykazują dużą zmienność w czasie. Stan taki wynika ze zmienności w czasie warunków oraz intensywności procesu spalania realizowanego w kotłach na ekogroszek.

Układ sterowania kotłem przewiduje bowiem czasowe odstawienie układów podawania paliwa i powietrza po osiągnieciu zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła. Skutkuje to wystąpieniem stanu nieustalonego, polegającego na powolnym spalaniu się nagromadzonego w palenisku paliwa w warunkach niedomiaru powietrza. Po pewnym czasie temperatura wody na wyjściu z kotła spada poniżej dolnej wartości progowej i układy podawania paliwa i powietrza zaczynają pracować. Ponownie skutkuje to okresowo występującym stanem nieustalonym, w którym proces spalania paliwa ponownie nabiera pierwotnej intensywności.

Palenisko kotła na ekogroszek pracuje zatem w sposób szarżowy. Każdą szarżę rozpoczyna i kończy przejściowy okres nieustalony pod względem procesu spalania. W okresach pomiędzy kolejnymi szarżami nagromadzony w palenisku węgiel spala się z niedomiarem tlenu.

Okresy czasowego odstawienia paleniska kotłowego występowały zarówno w czasie prezentowanej powyżej pierwszej serii pomiarowej jak i wszystkich pozostałych serii pomiarowych co jest uwidocznione na wykresach przedstawiających czasowe przebiegi stężeń np. CO.

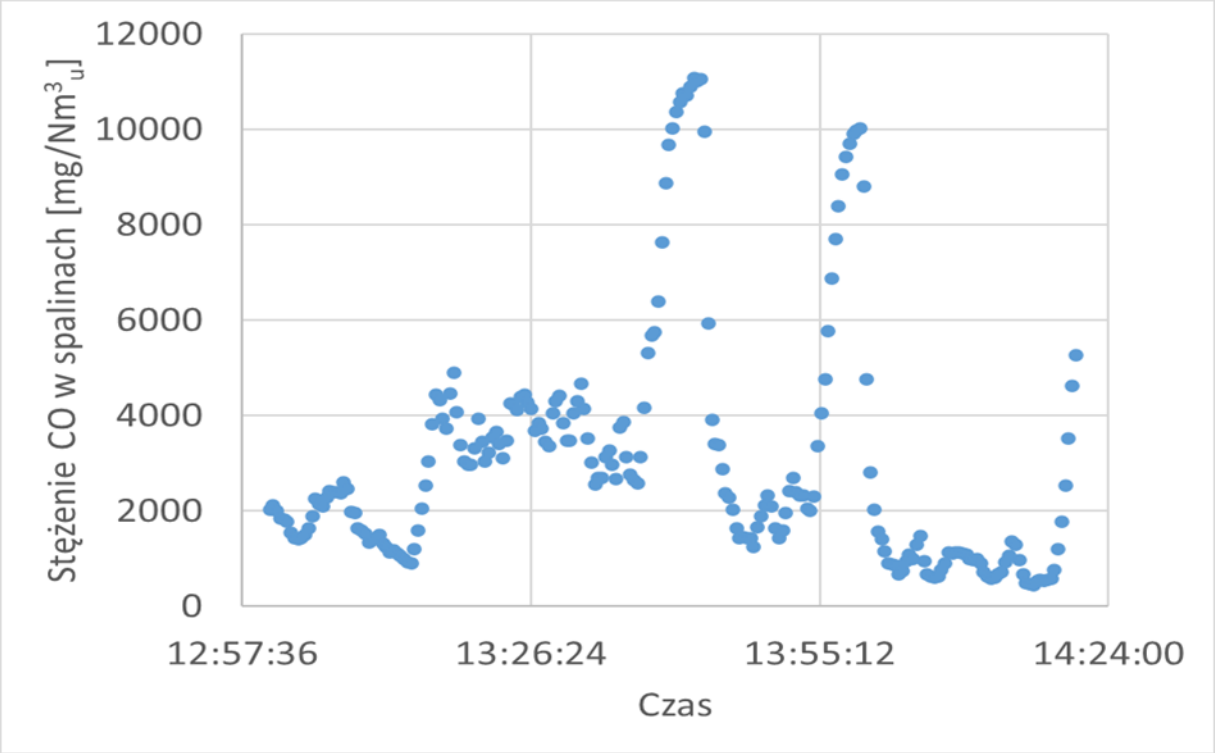
Mierzone stężenia niektórych innych gazów jak NH_3, HF we wszystkich seriach pomiarowych są na niskim poziome znajdującym się na granicy oznaczalności wykorzystywanego analizatora.

5.1.2. Druga seria pomiarowa

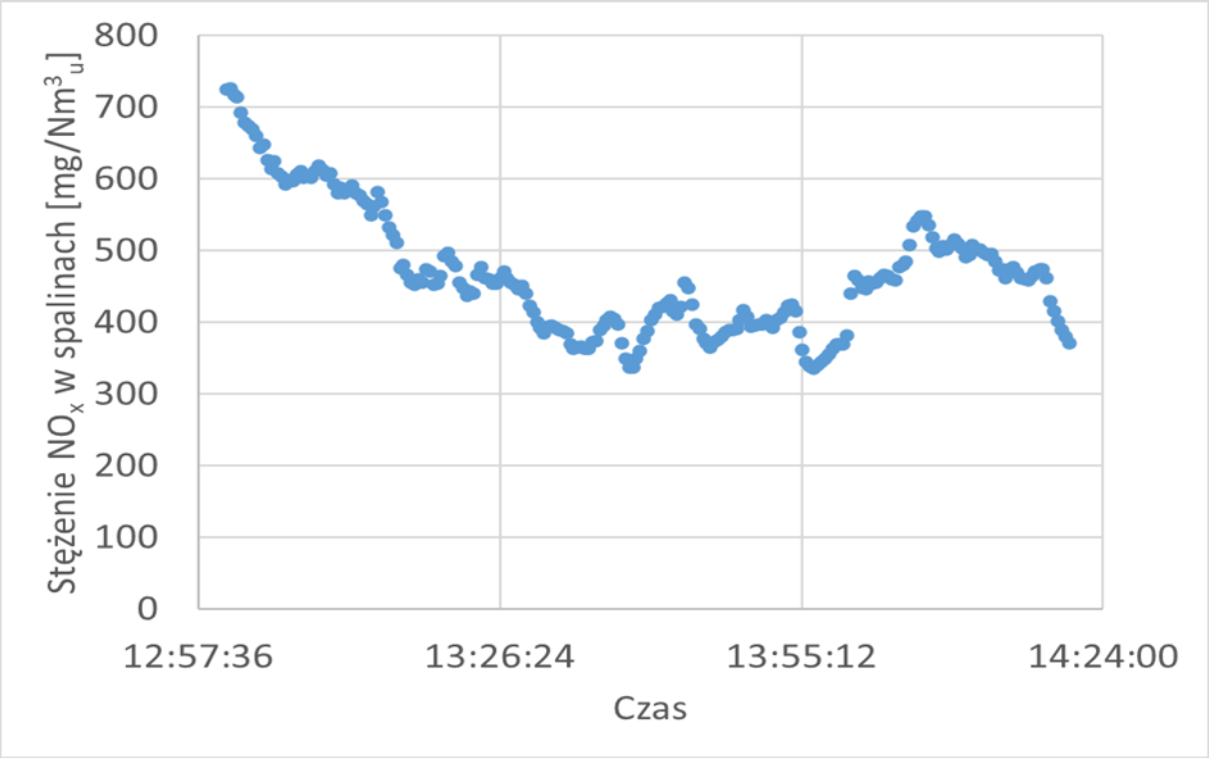
Pomiary w serii 2 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 9,1 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej wyniosła 2,3. Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 5 oraz na rysunkach 17-21. Wybrane dodatkowe ilustracje zamieszczono w załączniku 5 (rysunki 53-55).

Tabela 5 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w drugiej serii pomiarowej

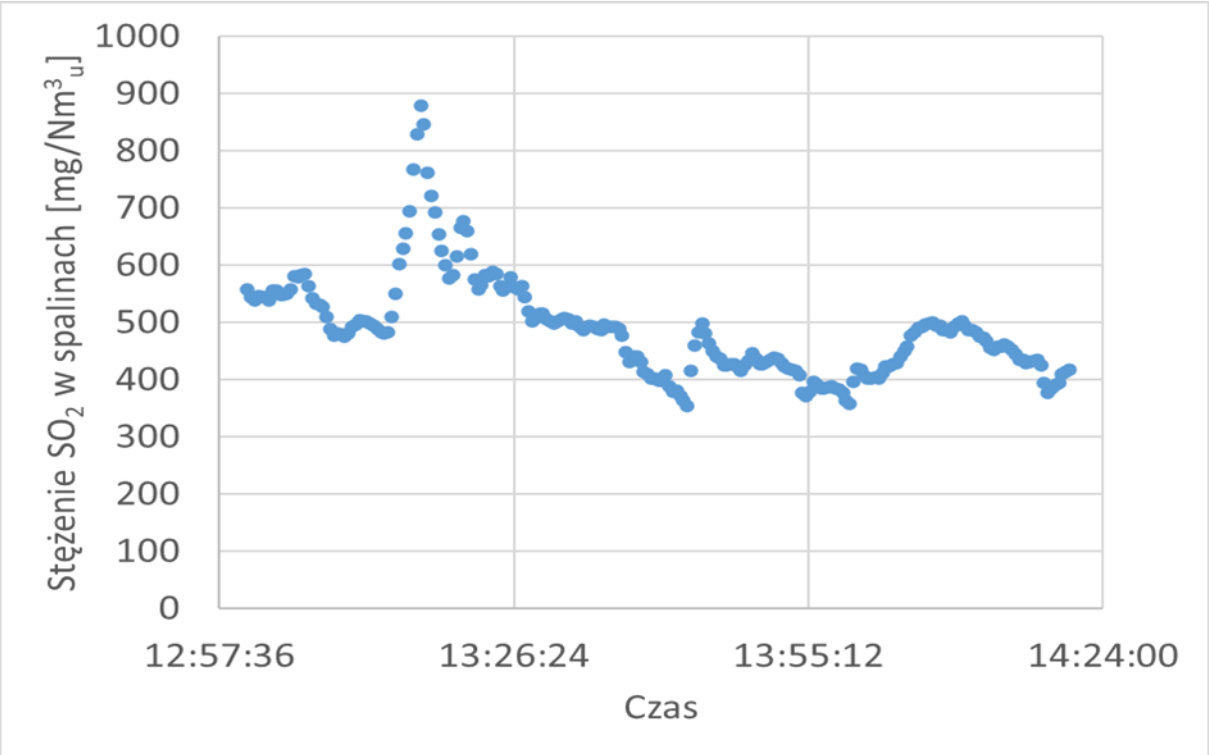
Czas	CO	N_2O	NO	NO_2	SO_2	NH_3	HCl	HF	CH_4
	mg/m³								
0:00	2006,71	33,57	423,41	16,23	559,19	0,71	1,24	0,29	20,97
0:10	2569,85	32,22	351,82	7,99	633,45	0,20	4,81	0,52	35,89
0:20	4011,18	43,30	302,62	1,69	581,76	0,00	2,62	0,34	72,97
0:30	5512,56	37,16	258,64	0,13	475,18	0,00	1,66	0,32	430,62
0:40	3848,03	37,96	272,51	0,00	448,59	0,00	1,64	0,56	383,72
0:50	4807,49	33,50	273,15	0,18	414,14	0,00	2,63	0,70	380,59
1:00	937,00	28,20	341,18	1,00	497,43	0,54	3,66	1,40	6,43
1:10	1522,03	27,32	304,10	0,09	442,02	0,48	4,25	1,58	37,33
średnia	**3228,03**	**34,46**	**315,98**	**3,50**	**509,06**	**0,23**	**2,76**	**0,68**	**177,56**



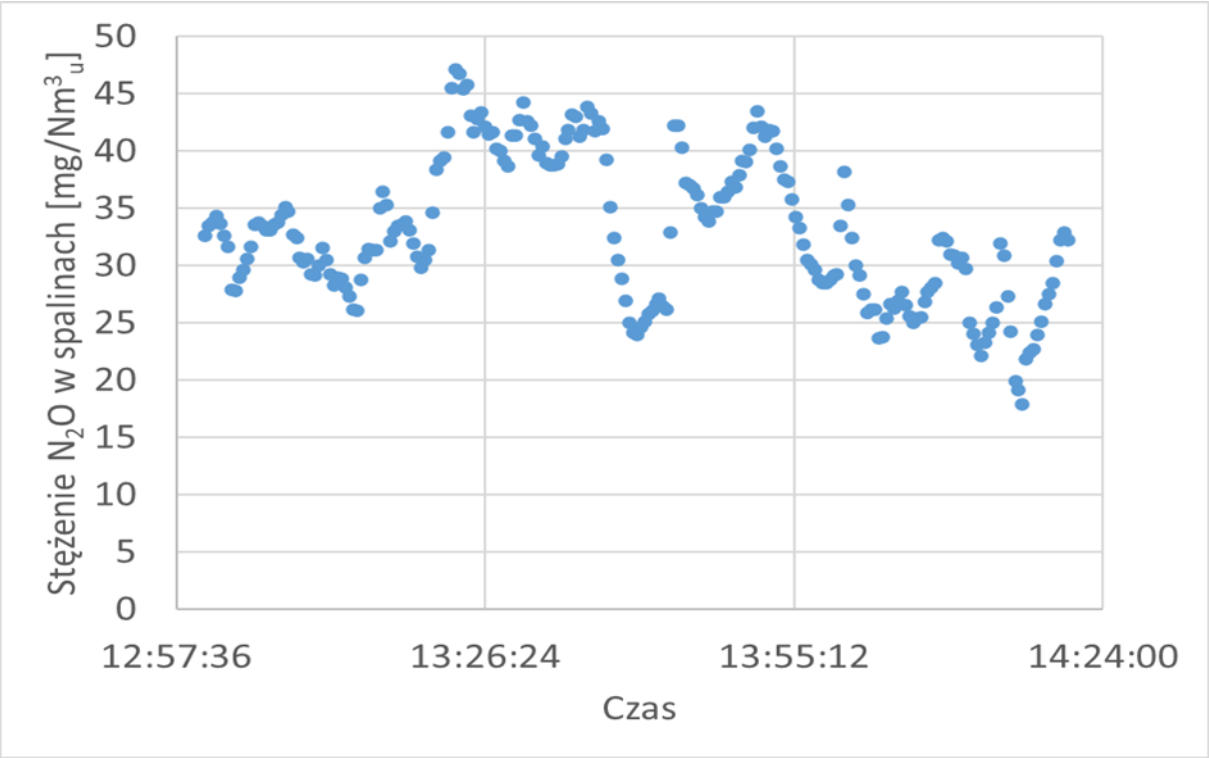
Rysunek 17 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



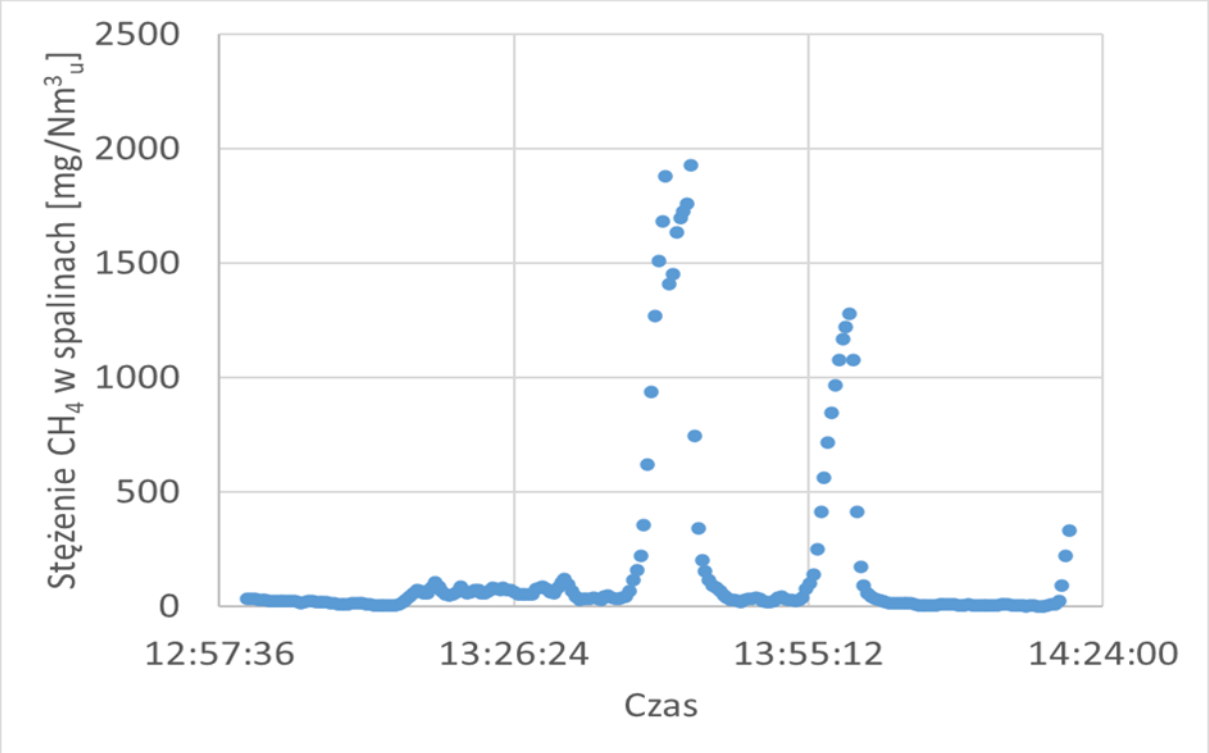
Rysunek 18 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



Rysunek 19 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



Rysunek 20 Stężenie N_2O w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



Rysunek 21 Stężenie CH_4 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej

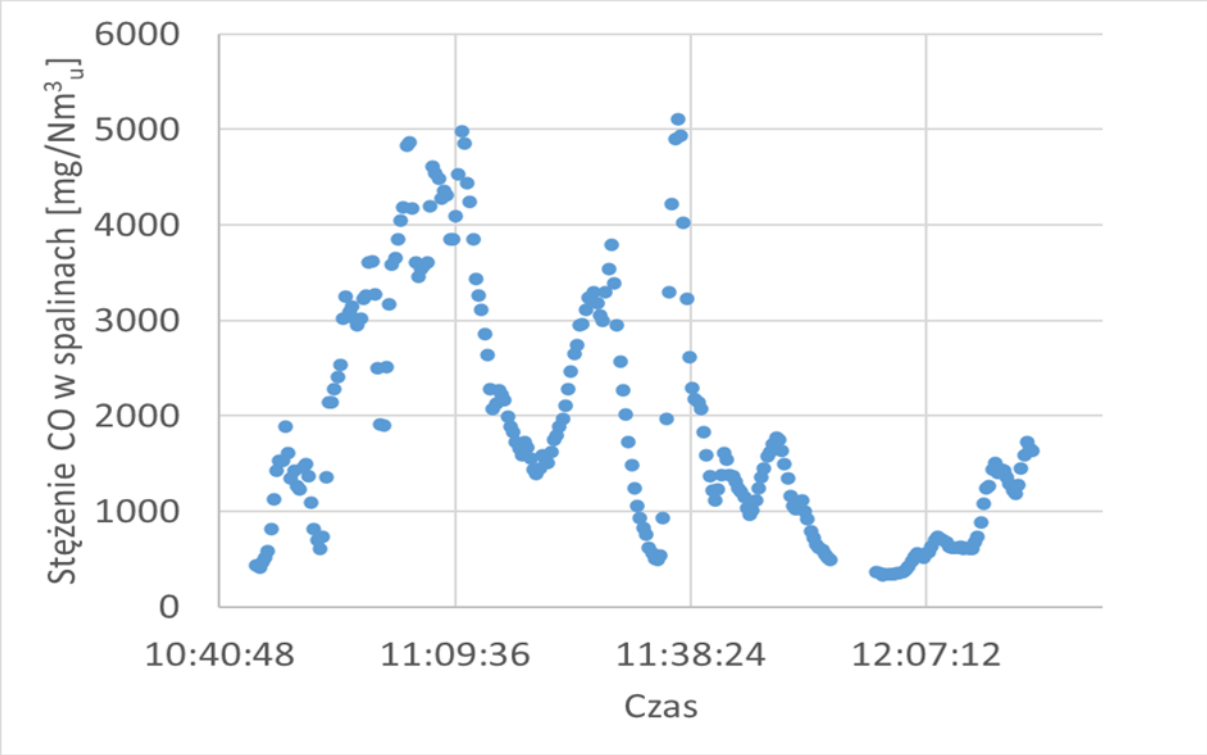
5.1.3. Trzecia seria pomiarowa

Pomiary w serii 3 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 11,5 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania czwartej serii pomiarowej wyniosła 5,5. Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 6 oraz na rysunkach 22-26. Wybrane dodatkowe ilustracje zamieszczono w załączniku 5 (rysunki 56-58).

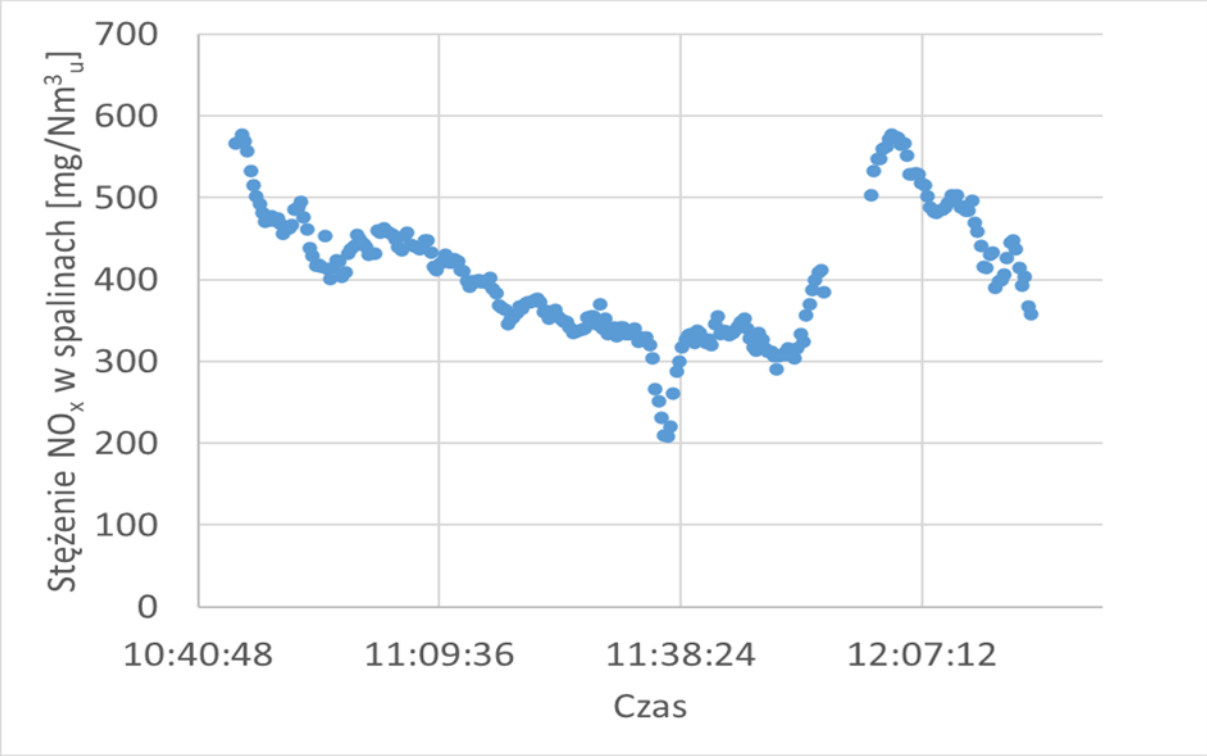
Tabela 6 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w trzeciej serii pomiarowej

Czas	CO	N_2O	NO	NO_2	SO_2	NH_3	HCl	HF	CH_4
	mg/m³								
0:00	1306,56	28,21	332,44	0,02	507,66	0,58	0,78	0,00	17,46
0:10	3495,78	37,52	298,12	0,00	546,27	0,07	1,99	0,48	77,38
0:20	3670,96	34,47	283,56	0,00	537,24	0,00	4,15	1,06	99,02
0:30	2226,36	40,99	243,09	0,00	580,45	0,10	7,28	1,34	42,20
0:40	2437,47	30,53	213,94	0,00	518,09	0,52	9,26	1,11	90,85
0:50	1617,52	28,80	224,98	0,00	442,42	0,78	7,40	0,35	55,78
1:00	877,76	22,62	273,29	0,98	449,72	1,66	4,61	0,66	12,67
1:10	670,51	24,05	341,36	0,34	459,45	1,77	3,06	0,59	5,14
1:20	1491,89	35,97	279,46	0,00	429,33	1,85	6,26	0,15	17,14
1:30	1306,56	28,21	332,44	0,02	507,66	0,58	0,78	0,00	17,46

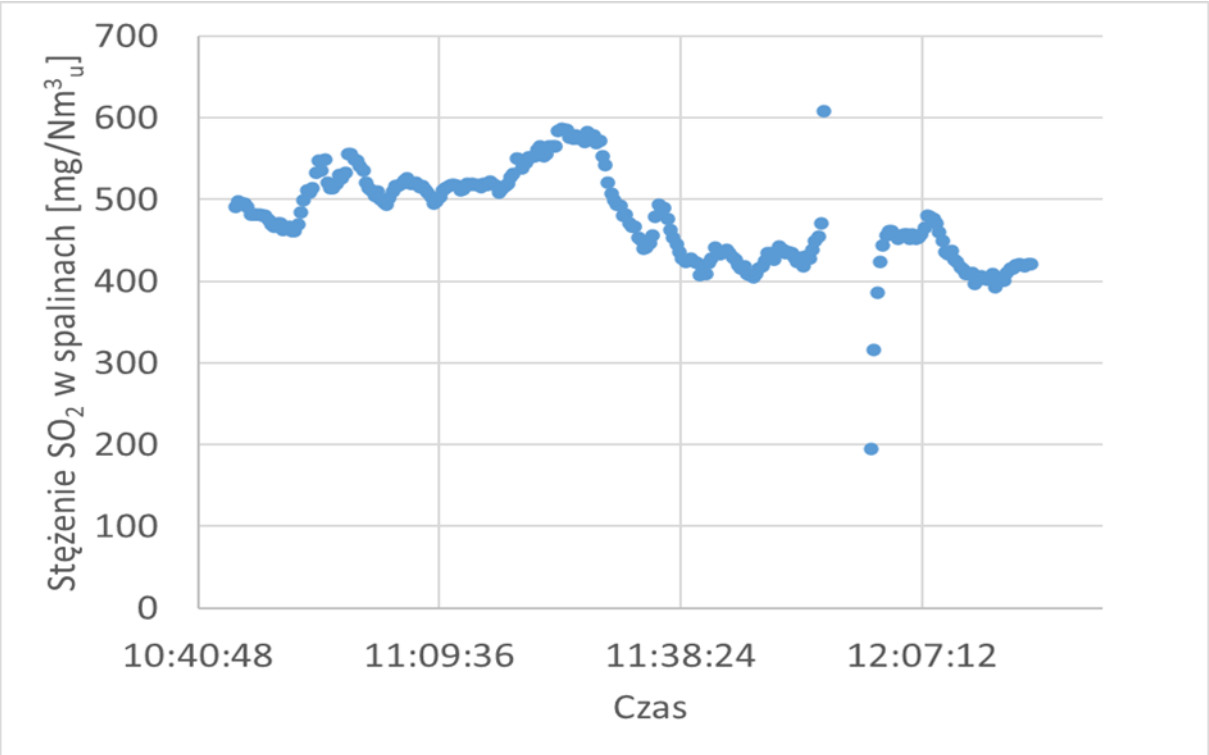
średnia	**2006,4**	**31,2**	**276,3**	**0,16**	**500,4**	**0,76**	**4,92**	**0,67**	**48,1**



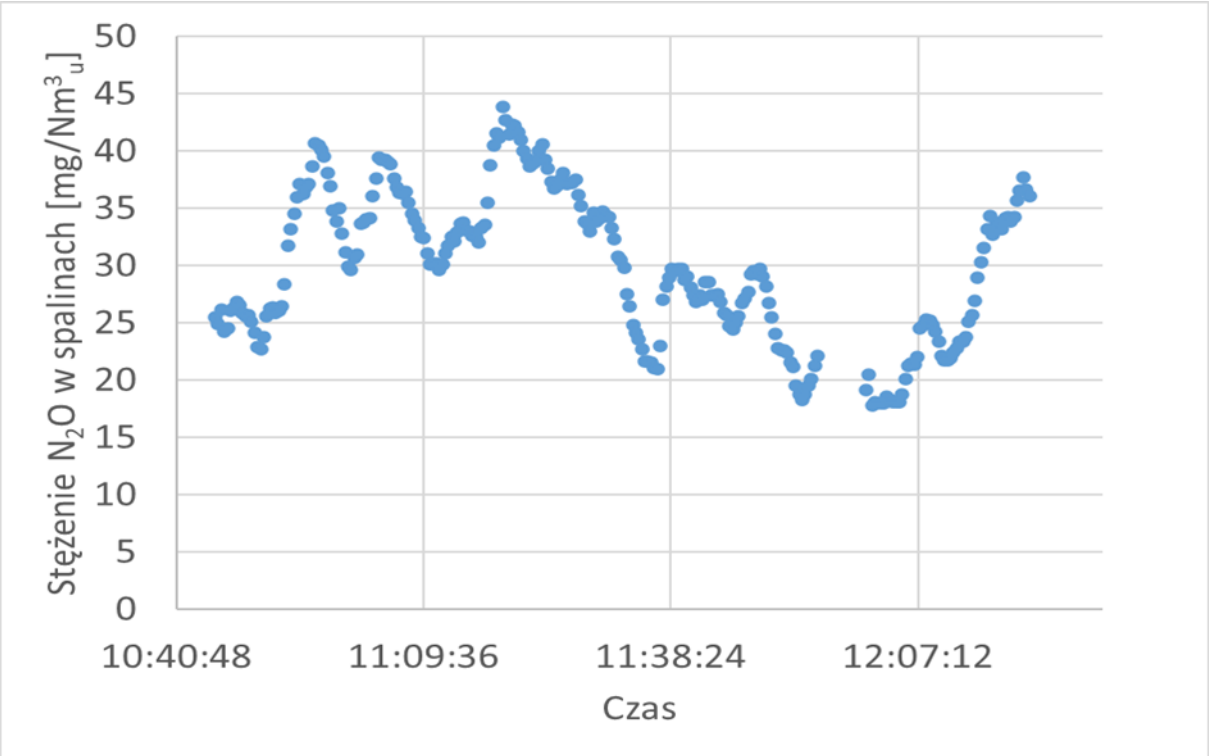
Rysunek 22 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



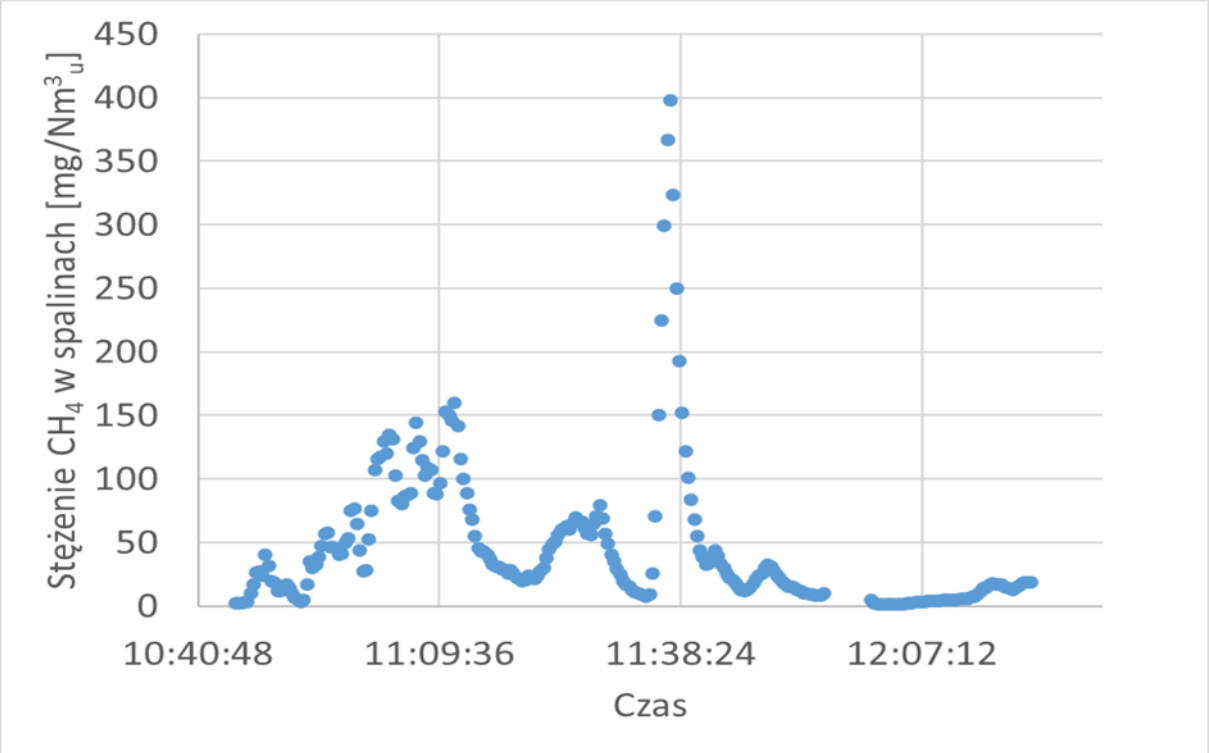
Rysunek 23 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



Rysunek 24 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



Rysunek 25 Stężenie N_2O w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



Rysunek 26 Stężenie CH_4 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej

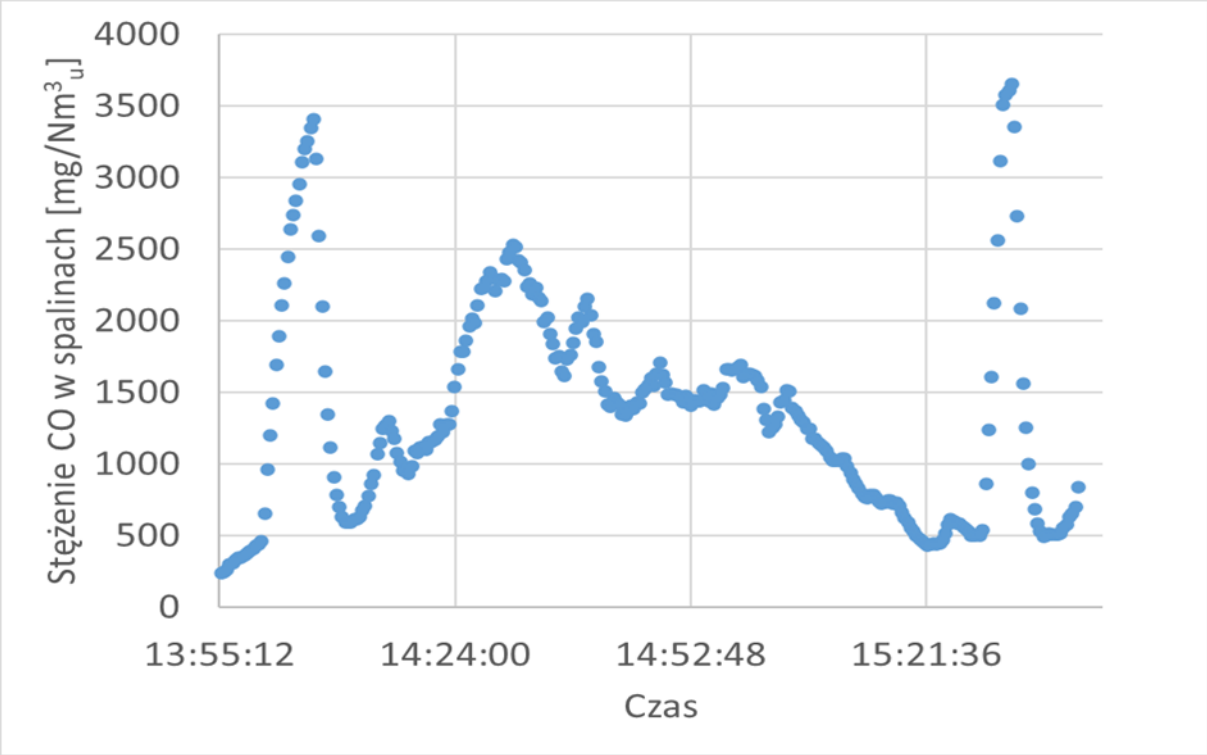
5.1.4. Czwarta seria pomiarowa

Pomiary w serii 4 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 13,9 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania czwartej serii pomiarowej wyniosła 13,4. Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 7 oraz na rysunkach 27-31. Wybrane dodatkowe ilustracje zamieszczono w załączniku 5 (rysunki 59-61).

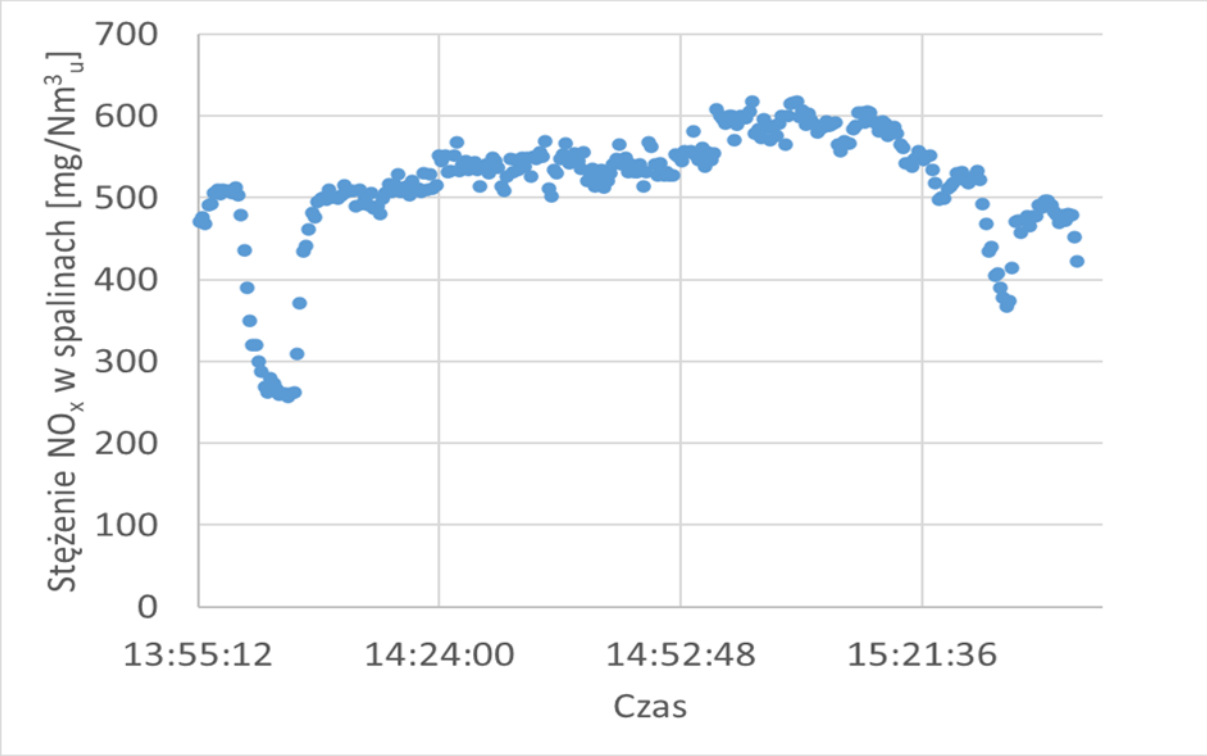
Tabela 7 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w czwartej serii pomiarowej

Czas	CO	N_2O	NO	NO_2	SO_2	NH_3	HCl	HF	CH_4
	mg/m³								
0:00	1076,81	28,16	267,97	0,00	398,99	1,87	5,13	0,49	18,12
0:10	1451,42	30,23	289,17	0,00	420,18	1,71	3,08	0,21	27,11
0:20	1293,37	24,87	338,01	0,00	448,25	2,59	0,37	0,31	17,79
0:30	2202,36	25,82	351,35	0,00	441,81	3,01	0,30	0,28	25,46
0:40	1638,22	23,28	349,73	0,00	409,30	3,35	0,03	0,53	27,04
0:50	1514,85	25,04	359,28	0,00	417,32	2,65	0,25	0,38	28,22
1:00	1419,04	30,79	387,31	0,00	453,83	2,39	0,66	0,22	26,42
1:10	858,27	27,96	381,50	0,00	423,09	2,08	0,01	0,26	14,25
1:20	584,34	21,46	341,38	0,00	455,39	1,75	0,04	0,19	11,54
1:30	1472,17	31,80	296,19	0,00	556,91	0,95	0,80	0,03	46,25

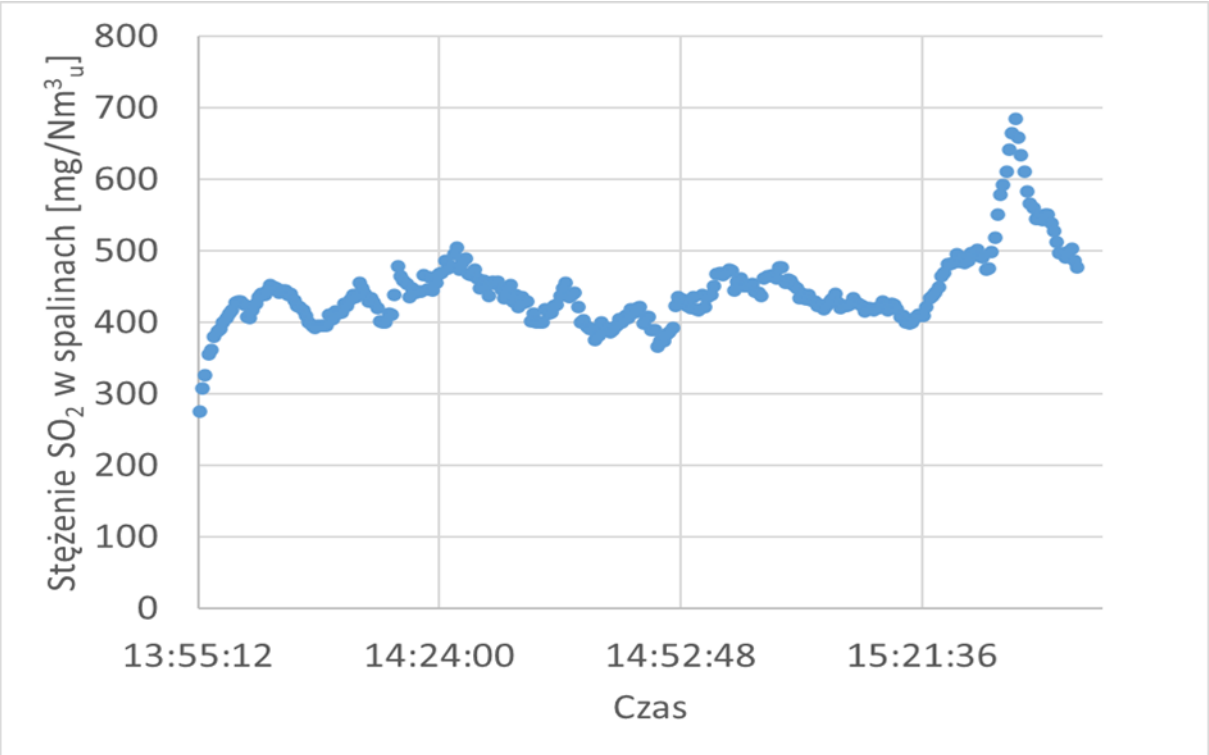
średnia	**1352,00**	**26,94**	**336,42**	**0,00**	**442,65**	**2,24**	**1,05**	**0,29**	**24,24**



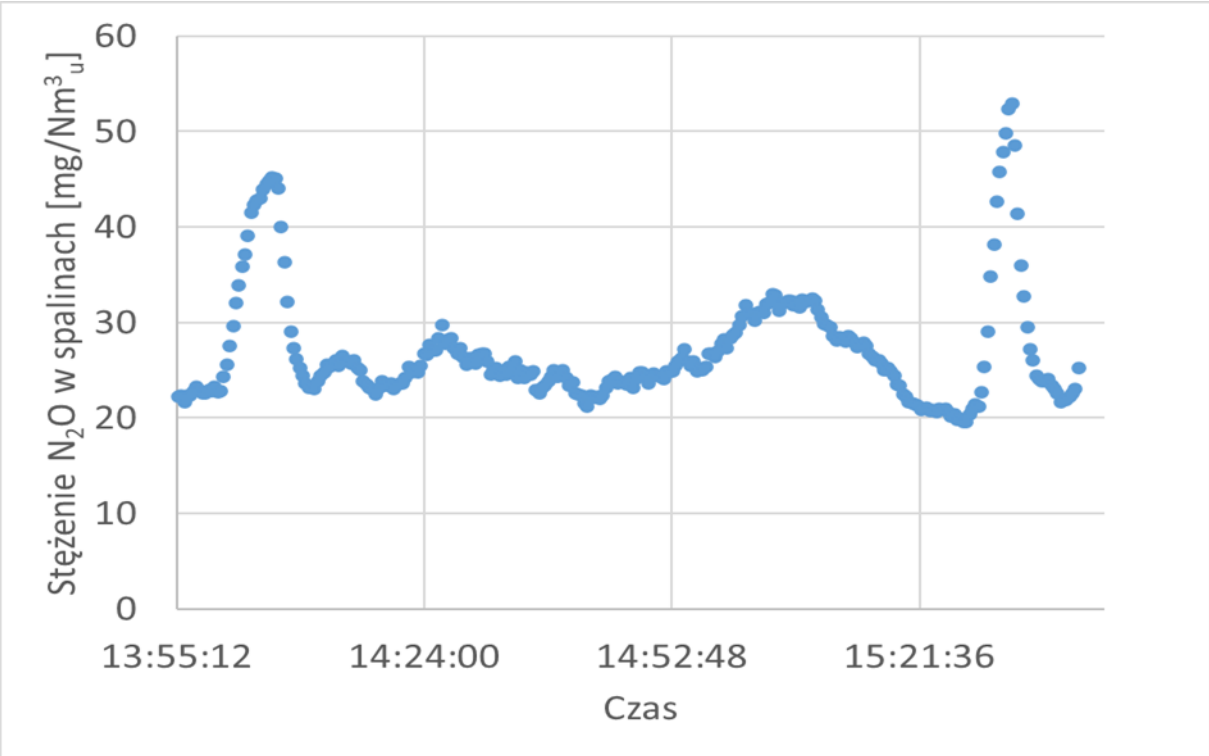
Rysunek 27 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



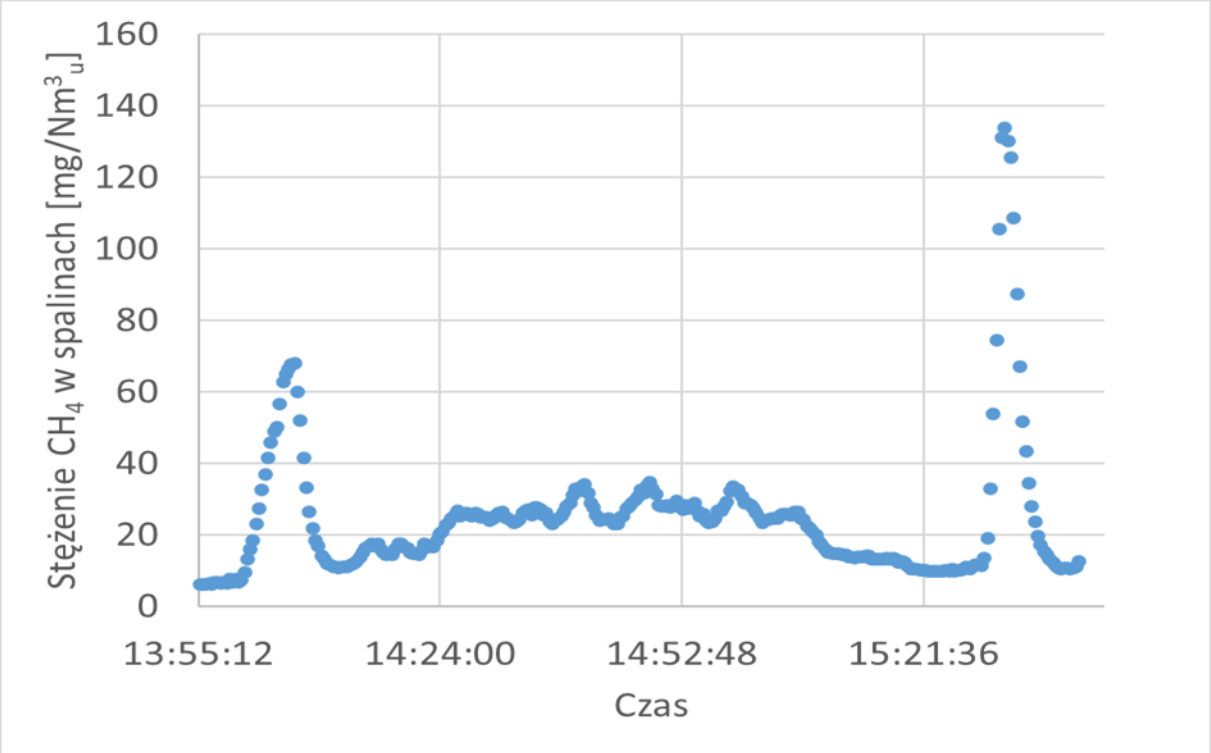
Rysunek 28 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



Rysunek 29 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



Rysunek 30 Stężenie N_2O w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



Rysunek 31 Stężenie CH_4 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej

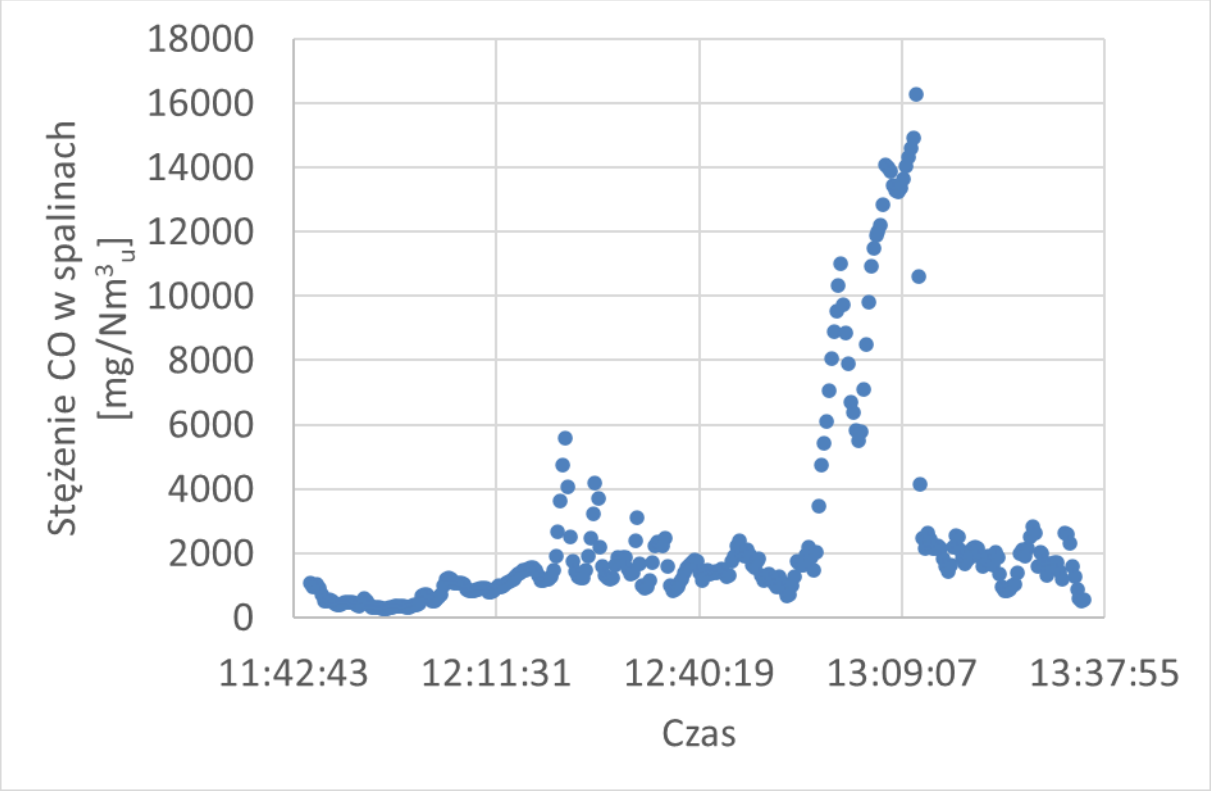
5.1.5. Piąta seria pomiarowa (ekogroszek [YYY])

Pomiary w serii 5 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 11,44 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania piątej serii pomiarowej wyniosła 3,3. Pomiary w piątej serii pomiarowej realizowane były z wykorzystaniem ekogroszku [YYY] Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 8 oraz na rysunkach 32-34.

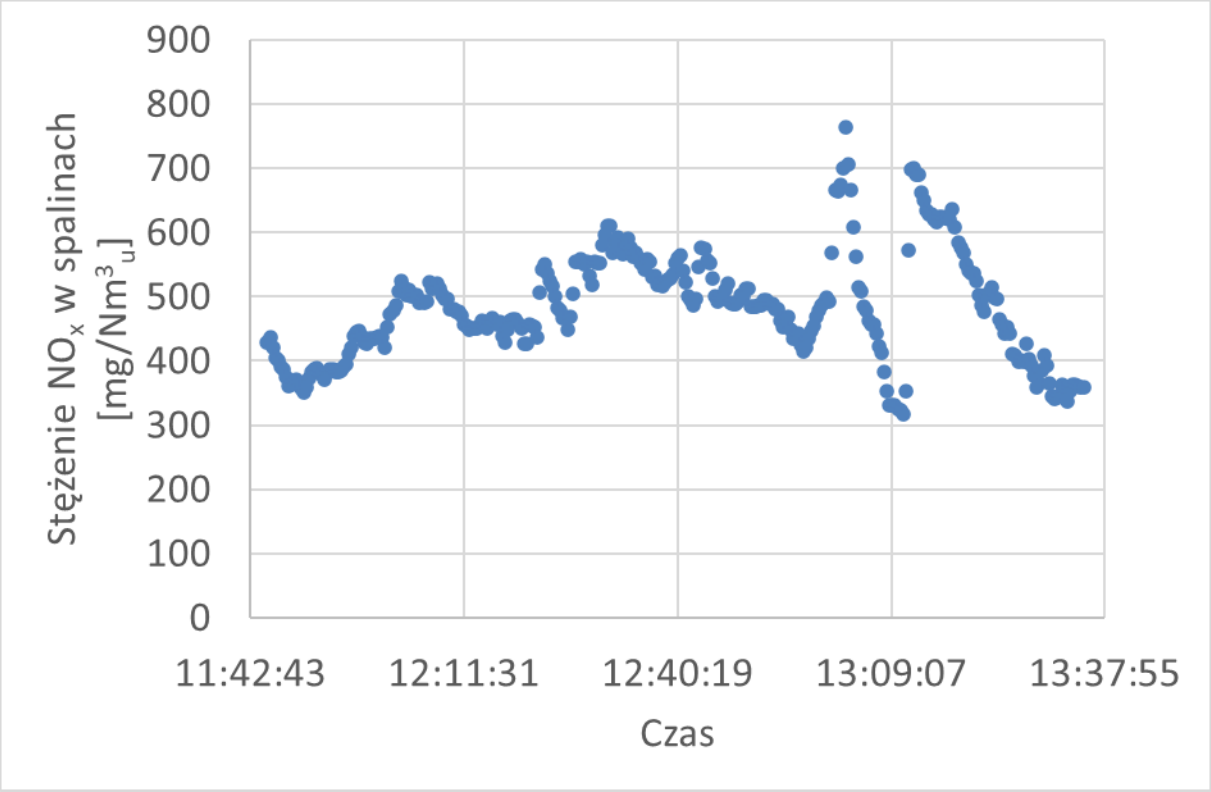
Tabela 8 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w piątej serii pomiarowej

Czas	CO	N_2O	NO	NO_2	SO_2	NH_3	HCl	HF	CH_4
	mg/m³								
0:00	545,64	12,42	241,72	13,71	353,09	1,63	1,16	0,11	1,97
0:10	557,69	13,30	289,74	18,26	360,22	1,37	1,25	0,28	2,60
0:20	1046,51	13,72	302,41	22,14	361,06	1,36	1,82	0,52	3,35
0:30	2201,71	18,49	298,36	14,83	392,65	0,97	1,38	0,43	33,90
0:40	1594,14	15,87	357,54	20,77	389,79	1,60	1,82	0,99	10,59
0:50	1600,53	19,55	329,01	30,27	386,79	0,37	1,14	0,62	13,61
1:00	1876,92	26,81	289,34	11,25	383,37	0,14	0,16	0,47	56,21
1:10	10118,79	27,53	322,41	0,00	507,57	0,00	3,42	1,22	1688,34
1:20	4942,96	30,09	348,93	0,00	429,18	0,00	0,28	0,38	551,95
1:30	1704,91	24,94	274,30	0,00	391,83	0,04	1,76	0,68	27,43

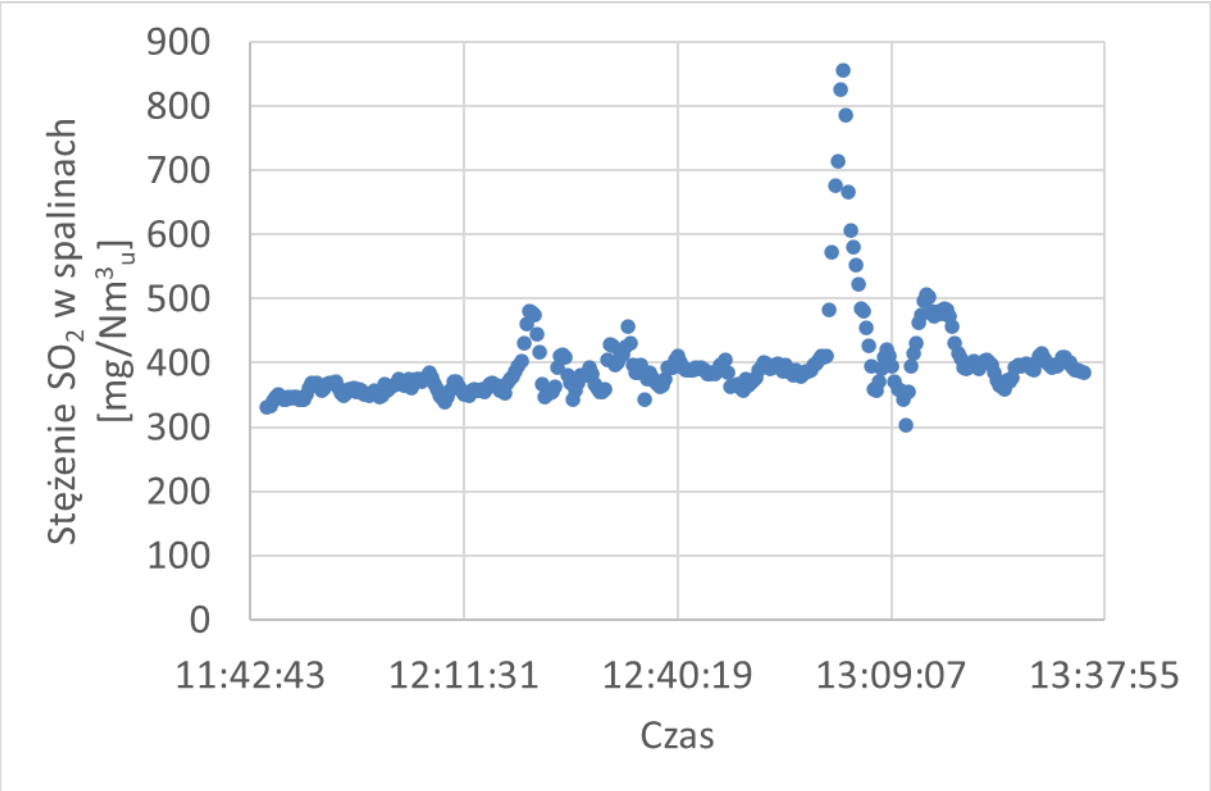
1:40	1473,25	17,38	219,51	0,00	395,96	0,03	0,94	0,66	34,30
średnia	**2574,36**	**20,17**	**301,74**	**12,53**	**395,71**	**0,71**	**1,40**	**0,58**	**230,60**



Rysunek 32 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania piątej serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])



Rysunek 33 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania piątej serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])



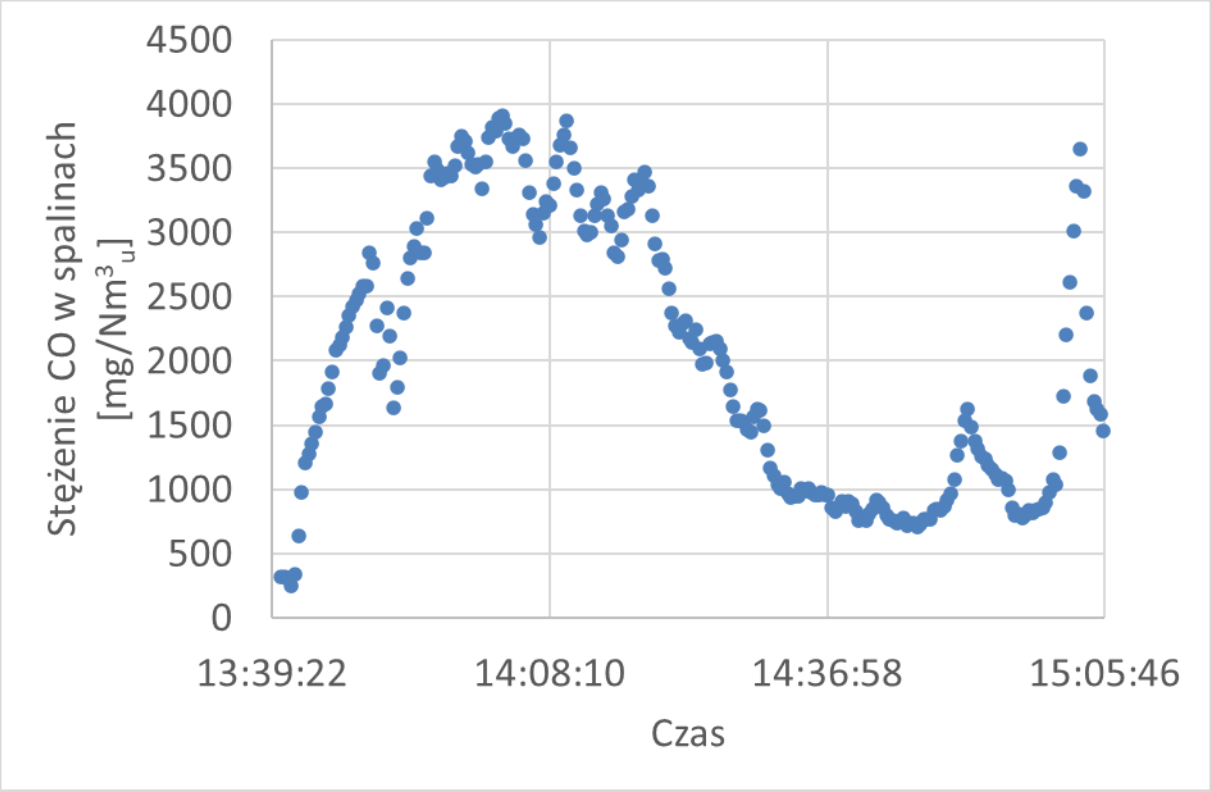
Rysunek 34 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania piątej serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])

5.1.6. Szósta seria pomiarowa (ekogroszek [YYY])

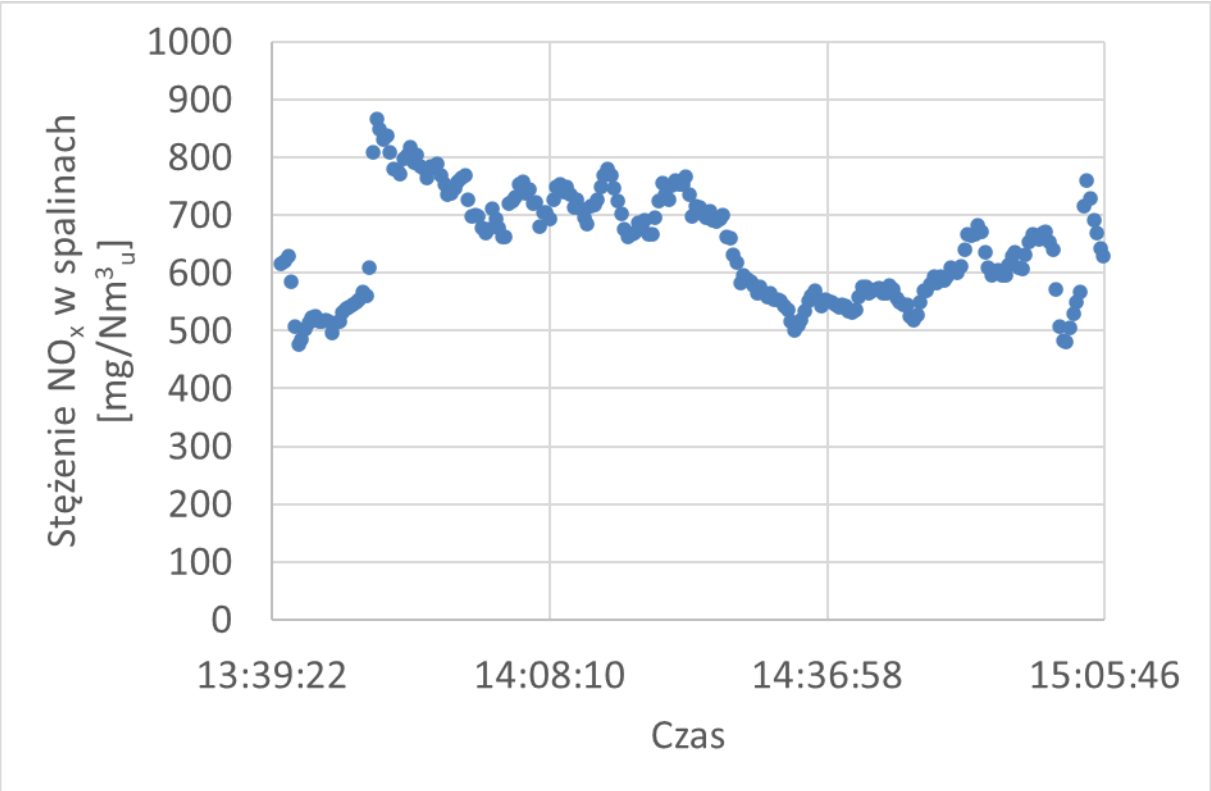
Pomiary w serii 6 prowadzono przy średniej mocy użytecznej kotła 12,57 kW. Wartość średnia współczynnika nadmiaru powietrza w czasie trwania szóstej serii pomiarowej wyniosła 4,6. Paliwem wykorzystywanym w czasie przedmiotowej serii podobnie jak w przypadku serii piątej był ekogroszek [YYY]. Przebieg wartości mierzonych parametrów emisyjnych przedstawiono w tabeli 9 oraz na rysunkach 35-37.

Tabela 9 Średnie 10-minutowe dla wybranych parametrów emisyjnych w szóstej serii pomiarowej

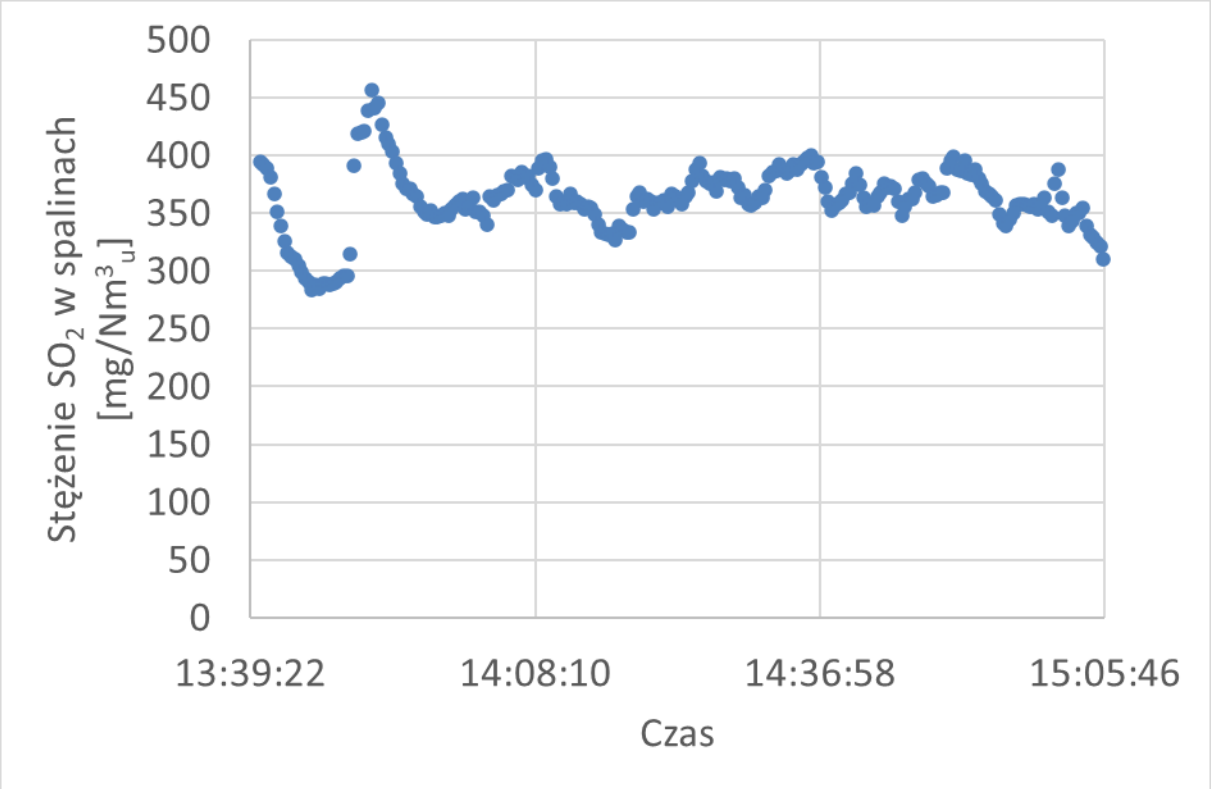
Czas	CO	N_2O	NO	NO_2	SO_2	NH_3	HCl	HF	CH_4
	mg/m³								
0:00	1670,28	31,00	345,29	0,26	323,53	0,24	1,16	1,41	4,00
0:10	2984,55	20,77	491,12	0,44	382,97	0,33	4,29	2,60	14,18
0:20	3533,49	18,25	454,06	0,41	369,56	0,38	3,41	2,66	38,65
0:30	2979,48	19,89	454,44	6,19	350,60	0,66	1,76	1,28	33,96
0:40	1709,24	16,42	403,35	15,10	372,70	0,39	1,50	0,73	12,84
0:50	897,12	15,11	347,59	13,49	376,09	0,20	1,85	0,67	6,90
1:00	990,00	14,81	377,31	10,21	375,25	0,11	1,98	1,13	4,95
1:10	1471,09	19,21	387,47	8,44	353,77	0,15	1,59	1,20	9,65
1:20	1585,04	16,26	418,37	15,79	321,23	0,45	1,17	0,92	10,28
średnia	**2023,57**	**19,33**	**408,01**	**6,99**	**362,53**	**0,31**	**2,18**	**1,45**	**15,60**



Rysunek 35 Stężenie CO w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania szóstej serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])



Rysunek 36 Stężenie NOx w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania szóstejj serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])



Rysunek 37 Stężenie SO_2 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania szóstej serii pomiarowej (ekogroszek [YYY])

5.2. Wyniki pomiarów stężeń pyłu całkowitego

Podczas każdej z serii pomiarowych dokonano poboru 4 próbek pyłu ze strumienia spalin. Poniżej (Tabela 10) przedstawiono szczegółowe wyniki uzyskane w poszczególnych seriach (z uwzględnieniem przeliczenia na warunki normalne).

Tabela 10 Wyniki pomiarów stężenia pyłu całkowitego w spalinach

Seria	Próbka	Stężenie TSP w próbce	Średnie stężenie TSP w serii
		mg/m³	
1	1-1	73,56	74,71
	1-2	71,30	
	1-3	86,57	
	1-4	67,41	
2	2-1	2756,95	1739,80
	2-2	1148,32	
	2-3	1739,80	
	2-4	1314,13	
3	3-1	2182,97	3250,85
	3-2	4492,99	

	3-3	2719,63	
	3-4	3607,83	
4	4-1	600,46	749,69
	4-2	693,55	
	4-3	814,31	
	4-4	890,44	

5.3. Interpretacja wyników

Zgodnie z przytaczaną wcześniej normą PN-EN 303-5:2012, analizowane źródło może zostać zakwalifikowane, jako kocioł opalany paliwem kopalnym, z załadunkiem automatycznym o mocy mniejszej bądź równej 50 kW. Według tej normy emisja CO nie powinna przekraczać:

- 500 mg/m^3 dla klasy 5;
- 1000 mg/m^3 dla klasy 4;
- 3000 mg/m^3 dla klasy 3.

Podane wartości odnoszą się do spalin suchych, w warunkach normalnych (0°C, 1013 mbar) przeliczonych na zawartość tlenu w spalinach równą 10%.

1 stycznia 2020 r. weszły w życie szczegółowe wymogi dotyczące kotłów na paliwo stałe, o których mowa jest w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią (tzw. Dyrektywa Ecodesign lub Ekoprojekt). W dyrektywie tej znajdują się m.in. wymagania emisyjne i energetyczne dla małych kotłów grzewczych. Wprowadziła ona dodatkowe wymagania emisyjne oraz konieczność spełnienia parametrów eksploatacyjnych w stosunku do przywoływanej wcześniej normy PN-EN 303-5:2012 (przede wszystkim w zakresie NO_x). Standardy emisyjne określone w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe obejmują m.in.:

- Emisję cząstek stałych – dla kotłów z podajnikiem automatycznym – ≤40 mg/m^3;
- Emisję tlenku węgla – dla kotłów z podajnikiem automatycznym – ≤500 mg/m^3;
- Emisję tlenków azotu (wyrażoną jako ekwiwalent dwutlenku azotu) – dla kotłów na paliwa kopalne – ≤350 mg/m^3.

W tabeli 11 zestawiono uśrednione wyniki pomiarów dla poszczególnych serii pomiarowych dla tych rodzajów zanieczyszczeń, które są przedmiotem regulacji wspomnianej wcześniej dyrektywy, zaś w tabeli 12 zestawiono pozostałe wyniki pomiarów.

Tabela 11 Uśrednione wyniki pomiarów dla wybranych parametrów emisyjnych z poszczególnych serii pomiarowych

Parametr	Jednostka	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	Seria 6
Tlenek węgla (CO)	mg/m^3	1693,58	3228,03	2006,47	1352,00	2574,36	2023,57

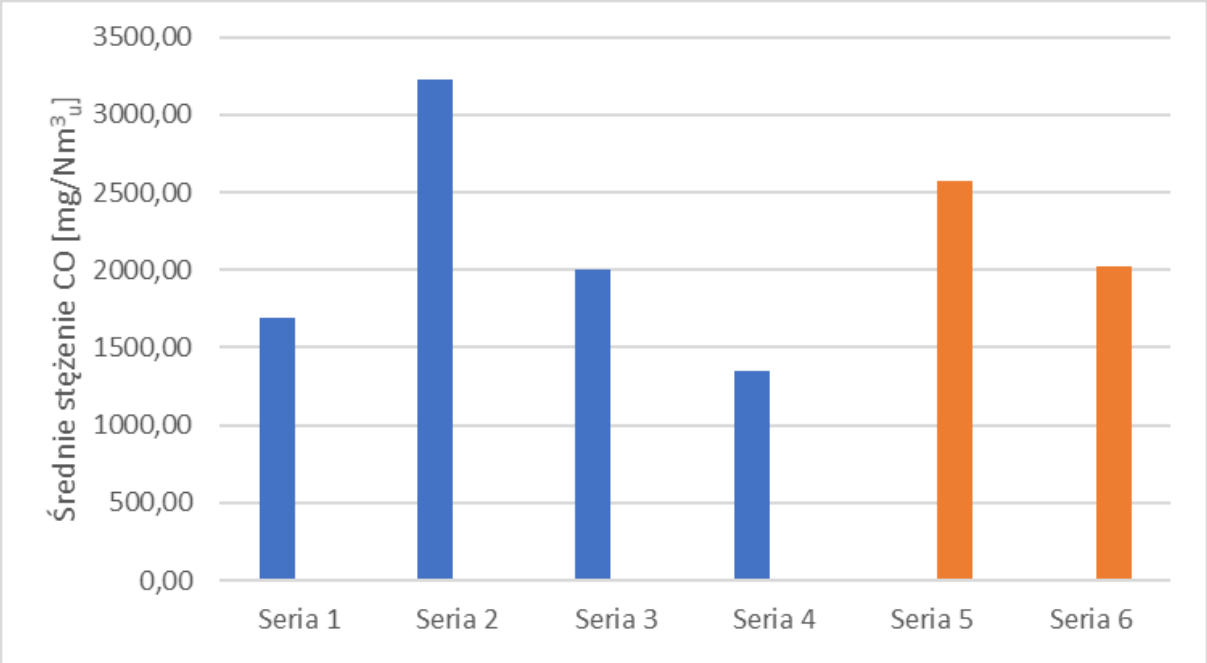
Tlenki azotu (NO_x)		633,10	488,00	423,85	515,84	482,80	644,90
Pył całkowity (TSP)		74,71	1739,80	3250,85	749,69	1389,70	217,67

Tabela 12 Uśrednione wyniki pozostałych pomiarów parametrów emisyjnych z poszczególnych serii pomiarowych

Parametr	Jednostka	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	Seria 6
Lambda	-	3,51	2,31	5,53	13,46	3,29	4,59
Podtlenek azotu (N_2O)	mg/m^3	25,33	34,46	31,23	26,94	20,16	19,3
Tlenek azotu (NO)		405,16	315,98	276,32	336,42	301,7	408
Dwutlenek azotu (NO_2)		11,85	3,50	0,16	0,00	12,53	7
Amoniak (NH_3)		1,15	0,23	0,76	2,24	0,7	0,3
Chlorowodór (HCl)		2,67	2,76	4,92	1,05	1,3	2,1
Fluorowodór (HF)		0,30	0,68	0,67	0,29	0,5	1,4
Metan (CH_4)		26,86	177,56	48,12	24,24	230,6	15,6

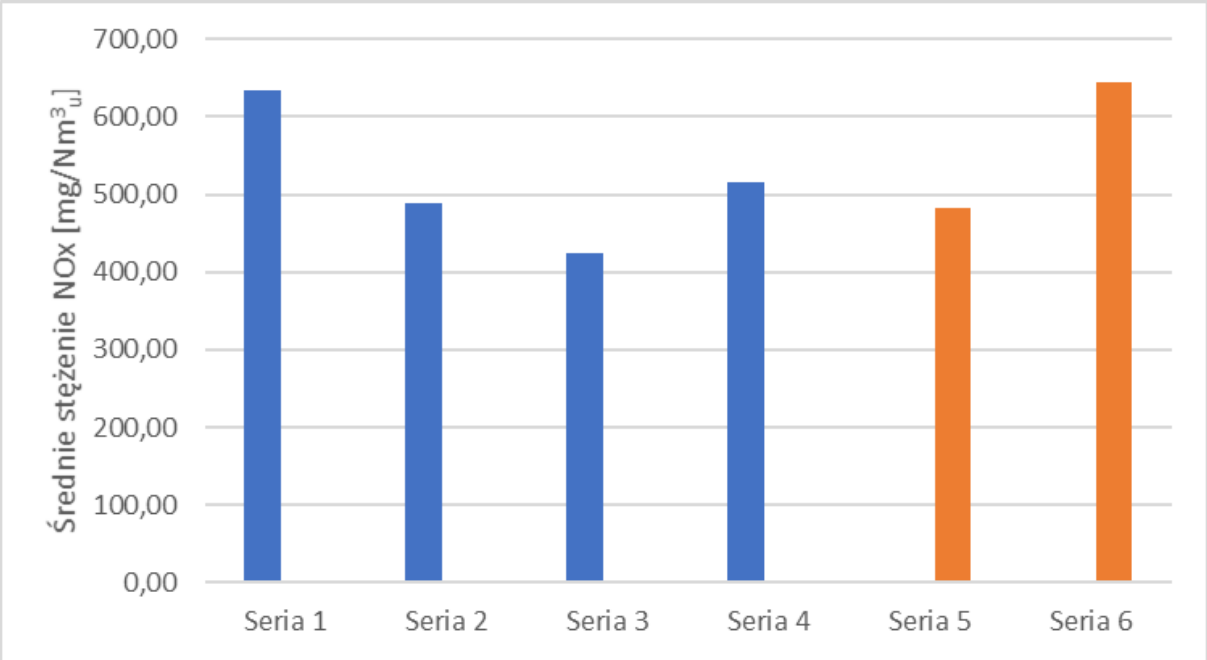
Zgodnie z uzyskanymi wynikami oraz w odniesieniu do stężenia substancji dla których określono standardy emisyjne w przywołanych powyżej dokumentach można stwierdzić, że:

- Zidentyfikowano znaczące przekroczenie stężenia tlenku węgla w stosunku do oczekiwanej wartości 500 mg/Nm^{3}u. W zależności od serii pomiarowej średnie (po czasie) stężenie CO w spalinach wynosiło od ok. 1300 do ponad 3000 mg/Nm^{3}u (Rysunek 38). Nie zidentyfikowano znaczącej różnicy w tym zakresie pomiędzy dwoma typami wykorzystywanego węgla.



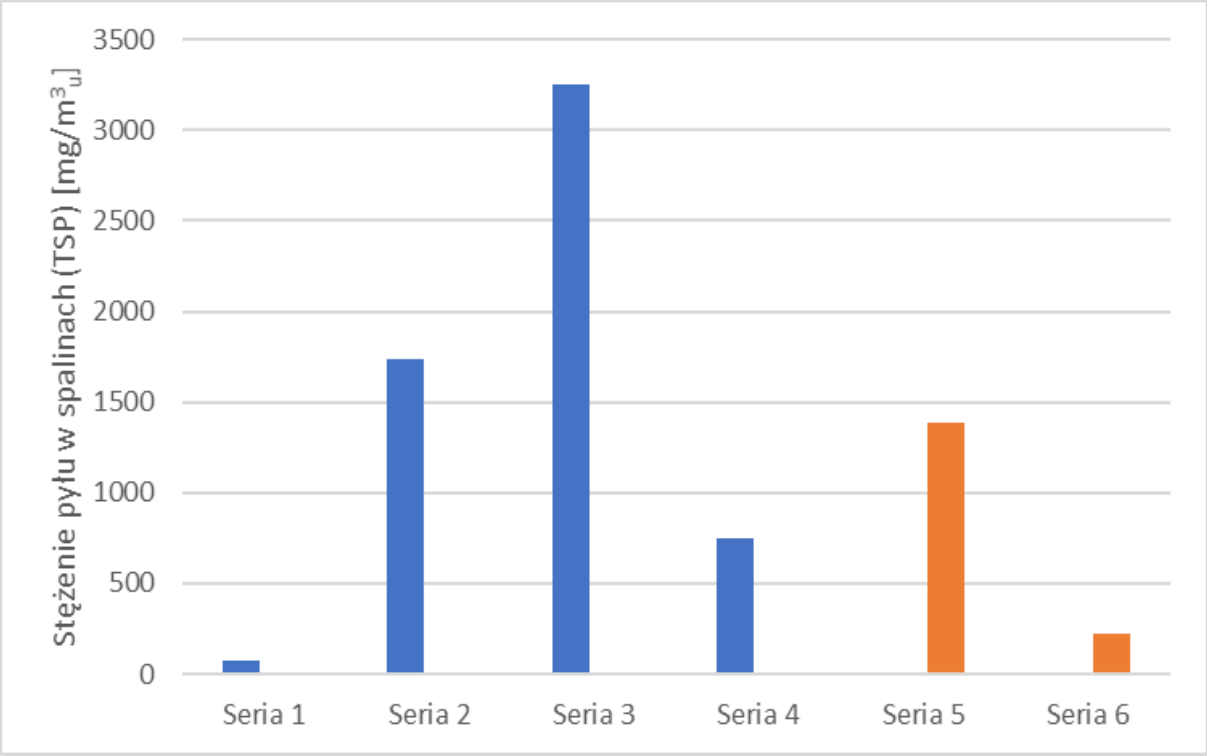
Rysunek 38 Średnie stężenie CO w spalinach w czasie wszystkich serii pomiarowych

- Zidentyfikowano przekroczenie stężenia tlenków azotu w stosunku do oczekiwanej wartości 350 mg/Nm^{3}u. W zależności od serii pomiarowej średnie po czasie stężenie NO_x w spalinach wynosiło od ok. 420 do ponad 600 mg/Nm^{3}u (Rysunek 39)



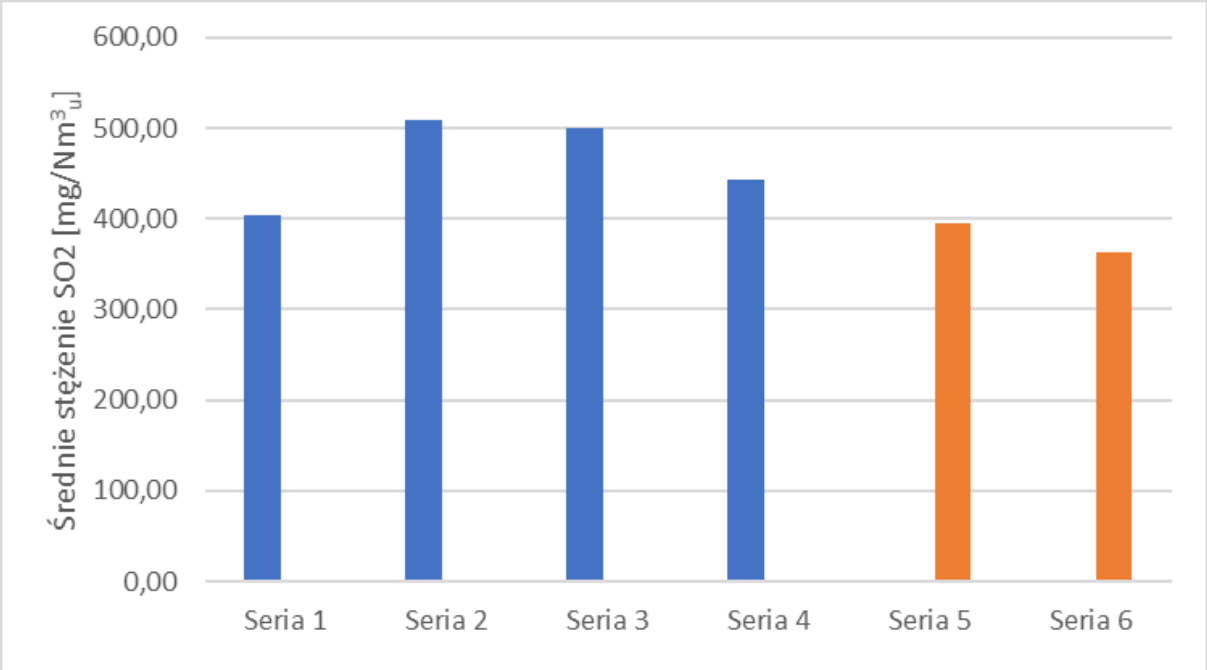
Rysunek 39 Średnie stężenie NO_x w spalinach w czasie wszystkich serii pomiarowych

- Zidentyfikowano przekroczenie stężenia pyłu całkowitego w stosunku do oczekiwanej wartości 40 mg/Nm^{3}u. W zależności od serii pomiarowej średnia emisja TSP wynosiła od niespełna 75 do ponad 3250 mg/Nm^{3}u (Rysunek 40)



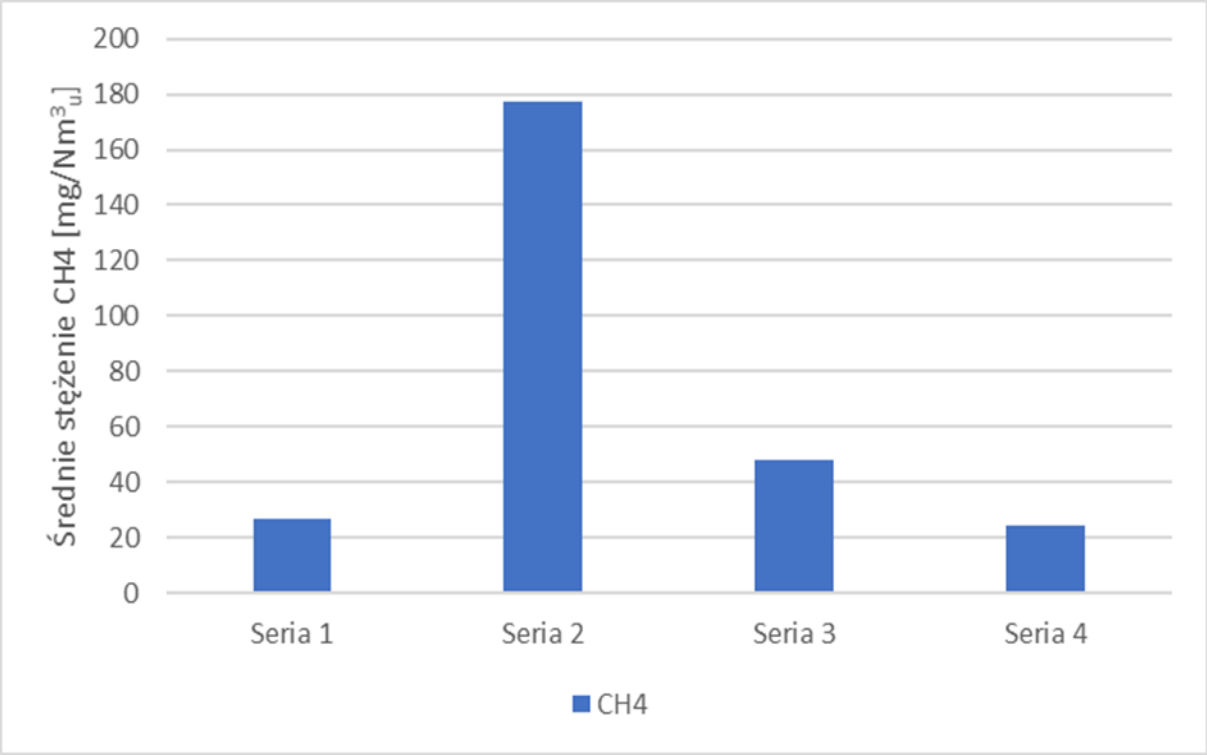
Rysunek 40 Średnie stężenie TSP w spalinach w czasie wszystkich serii pomiarowych

- Stężenie ditlenku siarki, które nie jest limitowane w spalinach kotłów na ekogroszek, dla wszystkich serii utrzymywało się na zbliżonym poziomie i wynosiło od 400 do 500 mg/Nm^{3}u (Rysunek 41). Średnie po czasie stężenie SO2 w gazach spalinowych powstałych ze spalania ekogroszku [YYY] było zauważalnie niższe od stężenia tego gazu w spalinach z ekogroszku [XXX].



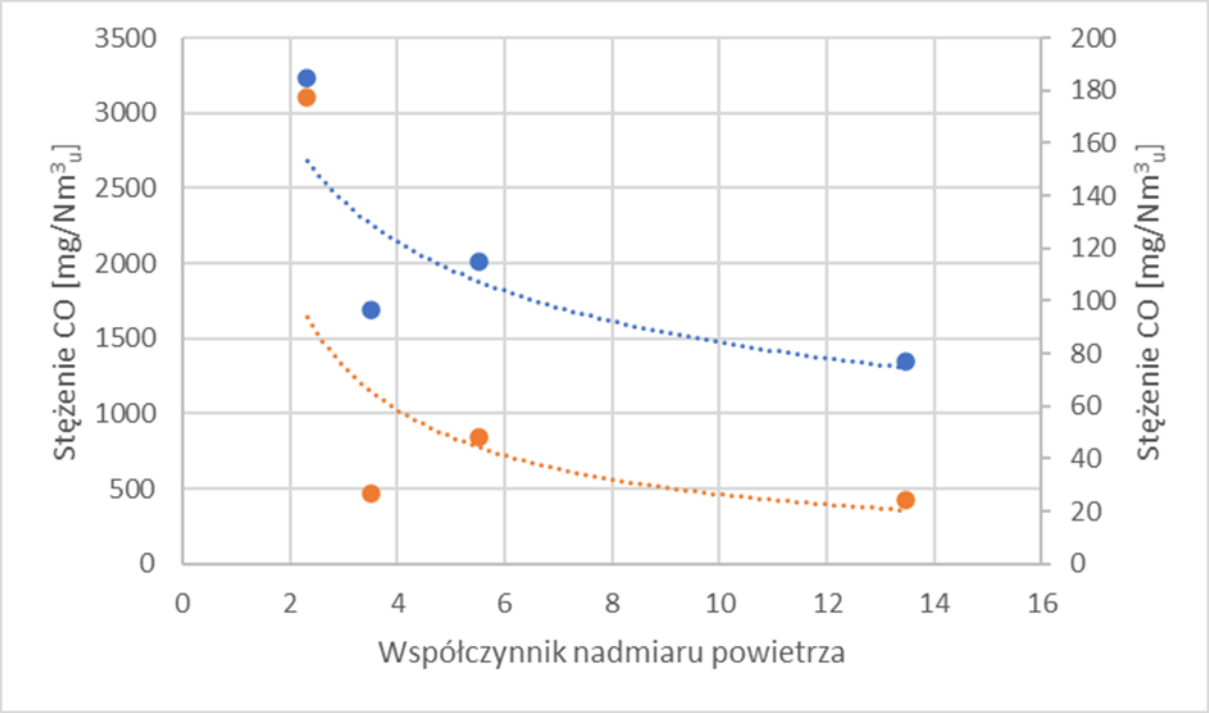
Rysunek 41 Średnie stężenie SO_2 w spalinach w czasie wszystkich serii pomiarowych

- Analizując pozyskane dane pomiarowe można ponadto dostrzec korelację pomiędzy współczynnikiem nadmiaru powietrza, a stężeniem gazów palnych w spalinach. Poza stężeniem CO również stężenie CH_4 osiąga swoją maksymalną wartość dla serii 2, dla której wartość współczynnika nadmiaru powietrza była najniższa (Rysunek 42). Poniższe wykresy obejmują jedynie serie związane ze spalaniem ekogroszku [XXX].



Rysunek 42 Średnie stężenie CH_4 w spalinach w czasie wszystkich serii pomiarowych

Wraz ze wzrostem wartości współczynnika nadmiaru powietrza mierzone stężenia gazów palnych w spalinach maleją (Rysunek 43). Należy w tym miejscu zauważyć, że wartości tego współczynnika mierzone w czasie pomiarów są wysokie. Dotyczy to w szczególności serii 3 i 4. Nie jest to z punktu widzenia efektywności prowadzenia kotła stan pożądany



Rysunek 43 Średnie stężenie CH_4 i CO w spalinach w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Należy zauważyć, że za prawidłową wartość współczynnika nadmiaru powietrza, z punktu widzenia efektywności pracy (ograniczania straty cieplnych), nawet tak małego kotła można uznać wartość tego współczynnika nieprzekraczającą 3, korzystniej bliską 2. Wartość przedmiotowego współczynnika w czasie niektórych serii pomiarowych, w szczególności dla serii 3 i 4 należy uznać za nieprawidłową. Kocioł nie powinien być eksploatowany przy tak wysokiej wartości strumienia powietrza.

Współczynnik nadmiaru powietrza jest podstawowym parametrem określającym warunki prowadzenia procesu spalania paliw. Jego wartość odzwierciedla stosunek rzeczywistej ilości powietrza dostarczanego do spalania do wartości teoretycznie wymaganej (stechiometrycznej).

W rzeczywistych aplikacjach technicznych, ze względu m.in. na niedoskonałość wymieszania paliwa z utleniaczem (powietrzem), w celu realizacji procesu spalania w sposób całkowity i zupełny (lub co najmniej zbliżony do niego) dostarczane jest do paleniska więcej powietrza, niż wynikałoby to ze stechiometrii. Wraz ze wzrostem wartości tego współczynnika maleje zatem zawartość palnych, gazowych składników spalin takich jak CO. Maleje również udział niespalonego węgla w żużlu i popiele lotnym. Tym samym ograniczane są straty cieplne kotła wynikające ze spalania niecałkowitego i niezupełnego. Czym wyższa wartość tego współczynnika tym wyższa staje się jednak wartość straty wylotowej z kotła tj. straty związanej z usuwaniem z kotła do otoczenia spalin o temperaturze wyższej niż temperatura otoczenia. Prawidłowo dobrana wartość współczynnika nadmiaru powietrza dla danego układu spalania powinna wynikać z minimalizacji sumy strat, a tym samym maksymalizacji sprawności. W kotłach rusztowych stosowane wartości współczynników nadmiaru powietrza są stosunkowo wysokie i nawet w dużych jednostkach energetycznych nierzadko zbliżają się do 2.

Wartość współczynnika nadmiaru powietrza decyduje w dużej mierze o przebiegu procesu spalania tj. m.in. o: temperaturze spalin, dostępności tlenu dla reakcji towarzyszących. Te z kolei parametry wprost są związane z tworzeniem w czasie procesu spalania zanieczyszczeń gazowych spalin

takich jak NOx. Generalnie więc, czym wyższa temperatura spalania i czym wyższa dostępność powietrza tym większa podatność do powstawania tych związków.

6. Wyniki analizy stężeń substancji zawartych w pyle całkowitym

6.1. Zawartość wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w pyle

Oceny zawartości wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) dokonano w pobranych próbkach pyłu. Jak już była o tym wcześniej mowa podczas każdej z serii pomiarowych dokonano poboru 4 próbek pyłu ze strumienia spalin. W każdej z nich, zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 3.2.2. oznaczono stężenia 16 WWA. Do analiz wybrano właśnie te 16 związków ze względu na fakt, iż zostały one zakwalifikowane przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (US EPA) do grupy szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia substancji, które od wielu lat stanowią przedmiot zainteresowań naukowców zajmujących się problematyką jakości powietrza. Wiele z tych substancji znajduje się również na liście Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (będącej agencją Światowej Organizacji Zdrowia), obejmujących substancje o potwierdzonym oddziaływaniu kancerogennym. W tabeli 13 przedstawiono szczegółowe wyniki analiz z poszczególnych serii (z uwzględnieniem przeliczenia na warunki normalne).

Tabela 13 Stężenia 16 wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w próbkach pyłu pobranych podczas spalania ekogroszku marki [XXX] (serie 1-4) i ekogroszku marki [YYY] (serie 5-6)

seria	próbka	WWA [ng/m^3]															
		naftalen	acenaftylen	acenaften	fluoren	fenantren	antracen	fluoranten	piren	benzo(a)antracen	chryzen	benzo(b)fluoranten	benzo(k)fluoranten	benzo(a)piren	dibenzo(ah)antracen	indeno(123-cd)piren	benzo(ghi)perylen
1	1	<pr.ozn.	0,56	2,02	1,16	11,04	<pr.ozn.	0,72	38,79	24,03	11,87	<pr.ozn.	<pr.ozn.	2,10	0,88	0,58	1,16
	2	<pr.ozn.	0,54	1,96	1,13	10,70	<pr.ozn.	0,70	37,60	23,29	11,51	<pr.ozn.	<pr.ozn.	2,04	0,85	0,56	1,13
	3	<pr.ozn.	0,66	2,38	1,37	12,99	<pr.ozn.	0,84	45,65	28,28	13,97	<pr.ozn.	<pr.ozn.	2,47	1,04	0,68	1,37
	4	<pr.ozn.	0,51	1,85	1,07	10,12	<pr.ozn.	0,66	35,55	22,02	10,88	<pr.ozn.	<pr.ozn.	1,93	0,81	0,53	1,07
	średnia		**0,57**	**2,05**	**1,18**	**11,21**		**0,73**	**39,40**	**24,41**	**12,06**			**2,14**	**0,89**	**0,59**	**1,18**
2	1	<pr.ozn.	565,47	108,08	30,47	720,32	139,94	177,79	1795,04	997,49	460,22	<pr.ozn.	<pr.ozn.	210,96	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	2	<pr.ozn.	235,53	45,02	12,69	300,03	58,29	74,05	747,67	415,47	191,69	<pr.ozn.	<pr.ozn.	87,87	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	3	<pr.ozn.	356,85	68,21	19,23	454,57	88,31	112,20	1132,78	629,47	290,43	<pr.ozn.	<pr.ozn.	133,13	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	4	<pr.ozn.	269,54	51,52	14,53	343,35	66,70	84,75	855,63	475,46	219,37	<pr.ozn.	<pr.ozn.	100,55	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	średnia		**356,85**	**68,21**	**19,23**	**454,57**	**88,31**	**112,20**	**1132,78**	**629,47**	**290,43**			**133,13**			
3	1	13,71	166,30	31,62	51,86	240,45	295,87	1399,09	979,55	776,68	299,07	382,07	228,30	299,00	46,60	151,43	314,59
	2	28,22	342,27	65,09	106,74	494,89	608,95	2879,61	2016,12	1598,58	615,54	786,37	469,89	615,41	95,92	311,67	647,48
	3	17,08	207,18	39,40	64,61	299,56	368,60	1743,04	1220,37	967,63	372,59	475,99	284,43	372,51	58,06	188,66	391,93
	4	22,66	274,84	52,26	85,71	397,39	488,98	2312,30	1618,92	1283,64	494,28	631,45	377,32	494,17	77,02	250,27	519,92
	średnia	**20,42**	**247,65**	**47,09**	**77,23**	**358,07**	**440,60**	**2083,51**	**1458,74**	**1156,63**	**445,37**	**568,97**	**339,98**	**445,27**	**69,40**	**225,51**	**468,48**
4	1	<pr.ozn.	25,42	4,02	4,65	24,49	35,19	178,49	160,60	154,59	74,71	5,66	18,28	10,34	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	2	<pr.ozn.	29,36	4,64	5,37	28,29	40,65	206,16	185,50	178,56	86,29	6,54	21,12	11,94	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.

	3	<pr.ozn.	34,47	5,45	6,31	33,21	47,72	242,06	217,80	209,65	101,31	7,68	24,79	14,02	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	4	<pr.ozn.	37,69	5,96	6,90	36,32	52,18	264,69	238,16	229,25	110,79	8,39	27,11	15,33	<pr.ozn.	<pr.ozn.	<pr.ozn.
	średnia		**31,73**	**5,02**	**5,81**	**30,58**	**43,94**	**222,85**	**200,52**	**193,01**	**93,27**	**7,07**	**22,83**	**12,91**			
5	1	<pr.ozn.	95,23	25,91	0,00	108,63	12,49	749,29	443,62	639,74	242,84	272,05	151,79	222,32	38,49	144,48	252,97
	2	<pr.ozn.	119,36	32,47	0,00	136,15	15,66	939,09	555,99	801,80	304,36	340,97	190,24	278,64	48,24	181,07	317,05
	3	<pr.ozn.	53,24	14,48	0,00	60,73	6,98	418,87	247,99	357,63	135,75	152,08	84,85	124,28	21,51	80,77	141,42
	4	<pr.ozn.	46,70	12,70	0,00	53,27	6,13	367,40	217,52	313,69	119,08	133,40	74,43	109,01	18,87	70,84	124,04
	średnia		**78,63**	**21,39**	**0,00**	**89,69**	**10,32**	**618,66**	**366,28**	**528,22**	**200,51**	**224,63**	**125,33**	**183,56**	**31,78**	**119,29**	**208,87**
6	1	<pr.ozn.	10,24	2,12	8,38	4,60	<pr.ozn.	35,10	24,33	87,96	129,22	10,96	3,47	8,98	3,25	2,47	4,57
	2	<pr.ozn.	8,02	1,66	6,56	3,60	<pr.ozn.	27,49	19,06	68,89	101,20	8,58	2,72	7,03	2,55	1,94	3,58
	3	<pr.ozn.	8,69	1,80	7,11	3,90	<pr.ozn.	29,78	20,64	74,63	109,63	9,30	2,94	7,62	2,76	2,10	3,88
	4	<pr.ozn.	6,57	1,36	5,37	2,95	<pr.ozn.	22,50	15,60	56,39	82,83	7,02	2,22	5,76	2,08	1,59	2,93
	średnia		**8,38**	**1,73**	**6,86**	**3,76**		**28,72**	**19,91**	**71,97**	**105,72**	**8,96**	**2,84**	**7,35**	**2,66**	**2,02**	**3,74**

<pr.ozn. – poniżej progu oznaczalności

Widoczne jest duże zróżnicowanie stężeń poszczególnych WWA w seriach. Relatywnie niskie stężenia stwierdzono w próbkach tych serii, w których zmierzone stężenie pyłu również było stosunkowo niewielkie, zaś zdecydowanie wyższe stężenia WWA zaobserwowano w próbkach, w przypadku których stwierdzano również wysoką zawartość pyłu. W poszczególnych seriach stwierdzono obecność niemal wszystkich analizowanych WWA (w tym w jednej serii wykazano obecność wszystkich 16 związków). Uwagę należy zwrócić na obecność w większości serii tych WWA, które należą do związków 5- i 6-pierścieniowych (benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)piren, dibenzo(ah)antracen, indeno(123-cd)piren, benzo(ghi)perylen), cechujących się większą aktywnością biologiczną. Mając na uwadze, że WWA są silnie związane z pyłem (adsorbują się na ich powierzchni), to ich depozycja w organizmie człowieka jest związana z tymi miejscami, w których deponują się pyły.

Dla celów określenia szkodliwości WWA na zdrowie człowieka wprowadzono różnego rodzaju współczynniki określające ich toksyczność, mutagenność, czy kancerogenność. Wśród związków o najwyższym wskaźniku toksyczności znajduje się w szczególności benzo(a)piren (BaP), będący jednocześnie substancją wskaźnikową dla oceny jakości powietrza atmosferycznego pod względem zanieczyszczenia substancjami z grupy WWA. Stężenia BaP w powietrzu w Polsce należą do jednych z najwyższych w Europie i najwyższych wśród wszystkich krajów Unii Europejskiej. Kluczowym źródłem jego emisji (podobnie, jak wielu innych WWA) jest spalanie paliw w indywidualnych kotłach i piecach służących do ogrzewania budynków. Według danych Europejskiej Agencji Środowiska z 2018 roku sektor komunalno-bytowy odpowiadał w Polsce za 85,3% całkowitej emisji WWA, zaś w przypadku samego benzo(a)pirenu było to 89%. Podobne udziały (mieszczące się w przedziale od 80% do 90%) dotyczą benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu i indeno(123-cd)pirenu.

We wszystkich zebranych seriach próbek pyłu obecny był (w różnych stężeniach) BaP. W 4 seriach stwierdzono również obecność dibenzo(ah)antracenu, cechującego się kilkukrotnie wyższym potencjałem toksyczności w stosunku do benzo(a)pirenu. Oba te związki, obok wspomnianych już wcześniej: indeno(123-cd)pirenu, benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, czy benzo(ghi)perylenu (wszystkie związki obecne w 4, choć różnych, seriach) cechują się relatywnie wysokim potencjałem mutagenności, jak również kancerogenności.

Obecność tych związków w spalinach (w niektórych przypadkach w znaczących stężeniach) wskazuje, że emisje pochodzące ze źródeł komunalno-bytowych mogą kształtować jakość powietrza pod względem wysokich stężeń WWA w powietrzu. Związków z tej grupy, co do zasady, w ogóle nie powinno być w powietrzu atmosferycznym, ze względu na ich wysoki potencjał szkodliwości dla zdrowia i życia człowieka.

6.2. Zawartość wybranych metali w pyle

Oceny zawartości wybranych metali również dokonano w pobranych próbkach pyłu, zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 3.2.3. W każdej z próbek z serii 1-4 oznaczono stężenia 14 metali, zaś w próbkach z serii 5-6 oznaczono stężenia 13 metali (bez magnezu). W tabeli 14 przedstawiono szczegółowe wyniki analiz z poszczególnych serii (z uwzględnieniem przeliczenia na warunki normalne).

Tabela 14 Stężenia 14 metali w próbkach pyłu pobranych podczas spalania ekogroszku marki [XXX] (serie 1-4) i ekogroszku marki [YYY] (serie 5-6)

seria	próbka	Metale [μg/m³]													
		V	Mn	Co	Ni	Cu	As	Rb	Cd	Pb	Ga	Cr	Mo	Ti	Mg
1	1	<pr.ozn.	0,029	0,002	0,008	0,031	0,012	0,043	0,000	0,029	2,722	0,025	0,005	0,049	3,732
	2	<pr.ozn.	0,028	0,002	0,008	0,030	0,011	0,042	0,000	0,028	2,638	0,024	0,005	0,047	3,618
	3	<pr.ozn.	0,034	0,002	0,010	0,036	0,014	0,051	0,001	0,035	3,203	0,030	0,006	0,057	4,392
	4	<pr.ozn.	0,027	0,002	0,008	0,028	0,011	0,039	0,000	0,027	2,494	0,023	0,005	0,044	3,421
	średnia		**0,03**	**0,00**	**0,01**	**0,03**	**0,01**	**0,04**	**0,00**	**0,03**	**2,76**	**0,03**	**0,01**	**0,05**	**3,79**
2	1	<pr.ozn.	1,467	0,078	0,549	1,605	0,610	2,339	0,026	1,334	159,290	1,366	<pr.ozn.	1,560	215,386
	2	<pr.ozn.	0,611	0,032	0,229	0,669	0,254	0,974	0,011	0,556	66,347	0,569	<pr.ozn.	0,650	89,713
	3	<pr.ozn.	0,926	0,049	0,347	1,013	0,385	1,476	0,016	0,842	100,522	0,862	<pr.ozn.	0,984	135,922
	4	<pr.ozn.	0,699	0,037	0,262	0,765	0,291	1,115	0,012	0,636	75,927	0,651	<pr.ozn.	0,744	102,667
	średnia		**0,93**	**0,05**	**0,35**	**1,01**	**0,38**	**1,48**	**0,02**	**0,84**	**100,52**	**0,86**		**0,98**	**135,92**
3	1	<pr.ozn.	0,909	<pr.ozn.	0,180	1,028	0,339	1,466	0,010	0,501	108,336	0,706	<pr.ozn.	0,479	146,872
	2	<pr.ozn.	1,871	<pr.ozn.	0,370	2,116	0,698	3,017	0,021	1,031	222,977	1,453	<pr.ozn.	0,986	302,292
	3	<pr.ozn.	1,133	<pr.ozn.	0,224	1,281	0,423	1,826	0,013	0,624	134,970	0,879	<pr.ozn.	0,597	182,979
	4	<pr.ozn.	1,503	<pr.ozn.	0,297	1,699	0,561	2,423	0,017	0,828	179,049	1,167	<pr.ozn.	0,792	242,738
	średnia		**1,35**		**0,27**	**1,53**	**0,51**	**2,18**	**0,02**	**0,75**	**161,33**	**1,05**		**0,71**	**218,72**
4	1	<pr.ozn.	0,193	0,020	0,068	0,493	0,221	0,329	0,007	0,368	19,764	0,162	0,051	0,340	25,595
	2	<pr.ozn.	0,223	0,023	0,079	0,570	0,256	0,380	0,008	0,425	22,828	0,188	0,059	0,393	29,564
	3	<pr.ozn.	0,262	0,027	0,093	0,669	0,300	0,446	0,009	0,499	26,803	0,220	0,070	0,462	34,711

	4	<pr.ozn.	0,286	0,029	0,101	0,731	0,328	0,488	0,010	0,545	29,308	0,241	0,076	0,505	37,956
	średnia		**0,24**	**0,02**	**0,09**	**0,62**	**0,28**	**0,41**	**0,01**	**0,46**	**24,68**	**0,20**	**0,06**	**0,43**	**31,96**
5	1	<pr.ozn.	0,783	<pr.ozn.	0,236	1,160	0,277	1,384	0,011	0,468	83,685	0,657	<pr.ozn.	0,728	bd
	2	<pr.ozn.	0,981	<pr.ozn.	0,296	1,454	0,347	1,734	0,013	0,587	104,883	0,824	<pr.ozn.	0,912	bd
	3	<pr.ozn.	0,438	<pr.ozn.	0,132	0,649	0,155	0,774	0,006	0,262	46,782	0,367	<pr.ozn.	0,407	bd
	4	<pr.ozn.	0,384	<pr.ozn.	0,116	0,569	0,136	0,679	0,005	0,230	41,034	0,322	<pr.ozn.	0,357	bd
	średnia		**0,65**		**0,20**	**0,96**	**0,23**	**1,14**	**0,01**	**0,39**	**69,10**	**0,54**		**0,60**	
6	1	<pr.ozn.	0,135	0,009	0,035	0,216	0,069	0,201	0,003	0,171	13,003	0,100	0,021	0,161	bd
	2	<pr.ozn.	0,106	0,007	0,028	0,169	0,054	0,157	0,002	0,134	10,184	0,079	0,016	0,126	bd
	3	<pr.ozn.	0,115	0,008	0,030	0,183	0,059	0,170	0,002	0,145	11,032	0,085	0,018	0,137	bd
	4	<pr.ozn.	0,087	0,006	0,023	0,138	0,044	0,129	0,002	0,109	8,335	0,064	0,013	0,103	bd
	średnia		**0,11**	**0,01**	**0,03**	**0,18**	**0,06**	**0,16**	**0,00**	**0,14**	**10,64**	**0,08**	**0,02**	**0,13**	

<pr.ozn. – poniżej progu oznaczalności

bd – brak danych

Podobnie, jak w przypadku WWA, także w przypadku metali widoczne jest duże zróżnicowanie stężeń pomiędzy poszczególnymi seriami. Ponownie też niższe stężenia występowały w próbkach, w których zmierzone stężenie pyłu relatywnie mniejsze, a wyższą zawartość metali obserwowano w próbkach, które również cechowały się wysokimi stężeniami pyłu. Poza wanadem, którego obecności nie stwierdzono w żadnej z analizowanych próbek, w większości serii stwierdzono obecność niemal wszystkich rozważanych metali. W dwóch seriach nie stwierdzono obecności kobaltu, zaś w trzech molibdenu.

Podobnie, jak WWA metale wiążą się z pyłem i trafiają do organizmu człowieka (czy zwierząt) wraz z cząstkami pyłu zawieszonego obecnego w atmosferze m.in. wskutek emisji pochodzących z sektora komunalno-bytowego (choć nie tylko). Część z analizowanych metali cechuje się również silnym negatywnym (toksycznym) wpływem na organizm człowieka (np. As, Cd, Pb). Inne (jak np. Mn, Co, Ni, Cu, Cr, Mo) w pewnych stężeniach są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania, jednak w nadmiarze mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia.

7. Wyniki pomiarów stężeń frakcji pyłu $PM_{2,5}$ w pomieszczeniu

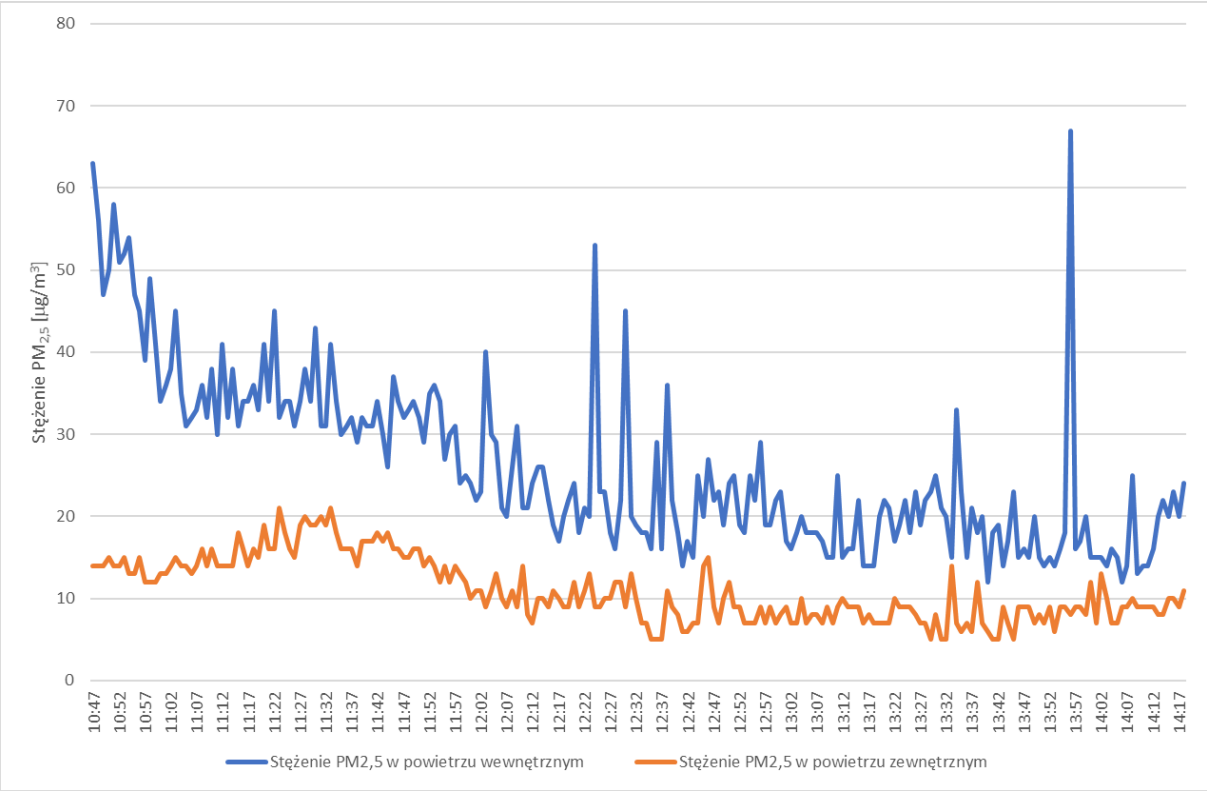
Jak już wspomniano w rozdziale 3.4.2 uzupełnieniem wykonanych badań był również pomiar stężenia pyłu we wnętrzu pomieszczenia, w którym prowadzono badania spalanego paliwa. Celem było dokonanie oceny, czy i w jakim ewentualnie stopniu użytkowanie kotła węglowego może powodować zwiększone stężenia pyłu w pomieszczeniach zamkniętych. Dla celów porównawczych jednoczesne pomiary prowadzono na zewnątrz budynku. Uwagę skupiono na frakcji $PM_{2,5}$ pyłu, ze względu na łatwość przenikania bardzo drobnych pyłów nie tylko do dolnych części układu oddechowego, ale również do układu krążenia.

Na wykresach zaprezentowanych w dalszej części rozdziału wskazano przebiegi zmienności stężeń pyłu $PM_{2,5}$ w trakcie trwania serii pomiarowych 1 i 2 oraz serii pomiarowych 3 i 4. Wyraźnie widoczne są zarówno różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w trakcie trwania obu serii, jak również różnice pomiędzy jakością powietrza wewnątrz pomieszczenia i na zewnątrz w trakcie trwania obu grup serii pomiarowych.

W dniu, w którym realizowano serie pomiarowe 1 i 2 (Rysunek 44) jakość powietrza zewnętrznego była relatywnie dobra, temperatura zewnętrzna była dość wysoka jak na tę porę roku (średnia 5,9°C[1]), ciśnienie atmosferyczne było wysokie (1025,7 hPA). Panowała relatywnie wysoka wilgotność względna powietrza (78%) i nieznaczna prędkość wiatru (4,1 km/h). Generalnie panowały korzystne warunki do wytworzenia właściwego ciągu kominowego. W całym okresie pomiarowym stężenie powietrza zewnętrznego kształtowało się na zatem na niskim poziomie, średnio 11,0 $\mu g/m^3$, z niewielkimi tendencjami do zmian w trakcie trwania pomiarów. W tym samym czasie stężenia pyłu $PM_{2,5}$ w kotłowni były wyraźnie wyższe (średnia z całego okresu pomiarowego to 26,1 $\mu g/m^3$), z zauważalną tendencją do spadku w miarę jak trwał proces badawczy. Choć paliwo w kotle rozpalono na 2 godziny przed rozpoczęciem badania, to jednak stężenia w momencie początku pomiarów

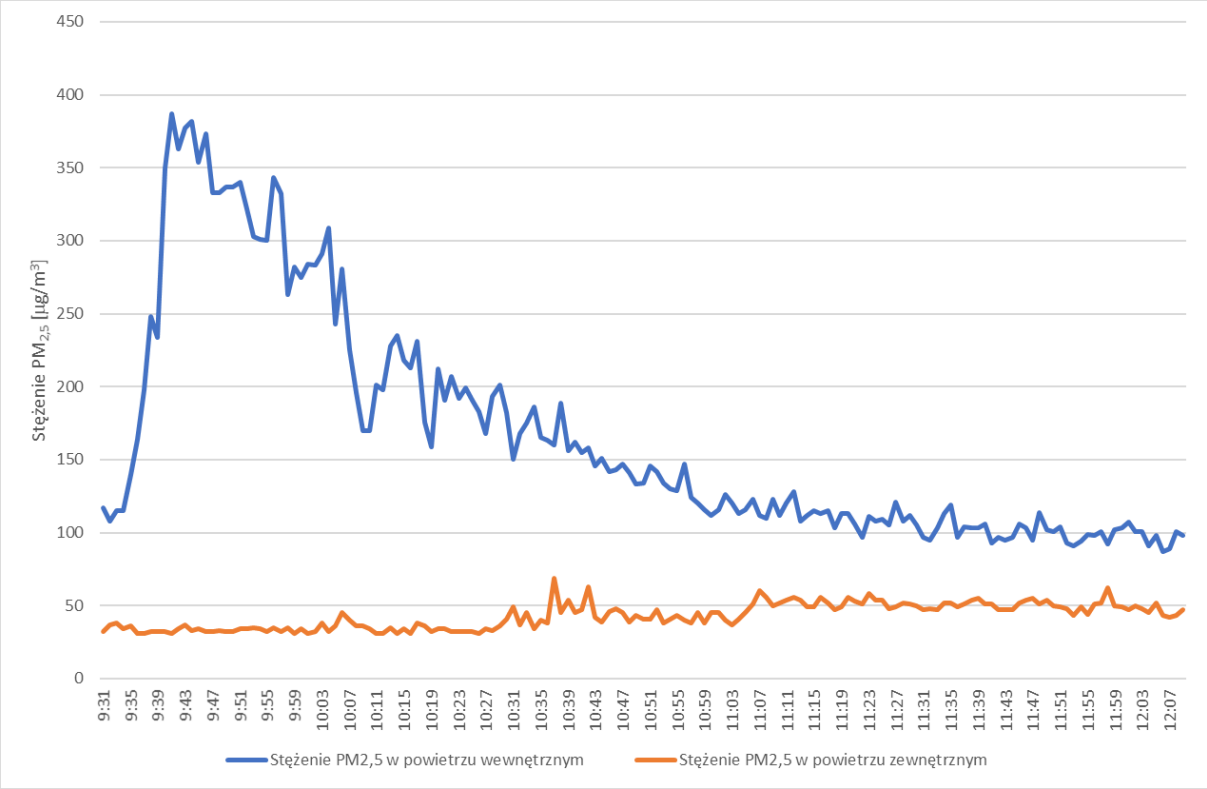
[1] Wartości uzyskane w oparciu o dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (meteomodel.pl)

kształtowały się na poziomie 40-60 μg/m^3.W końcowej części badań stężenia pyłu osiągnęły poziom ok. 20 μg/m^3.



Rysunek 44 Przebieg zmienności stężeń pyłów $PM_{2,5}$ wewnątrz kotłowni i w powietrzu zewnętrznym w trakcie pomiarów serii 1 i 2

Odmiennie kształtowała się natomiast tendencja w trakcie trwania pomiarów w serii 3 i 4 (Rysunek 45), kiedy to panowały inne warunki pogodowe, a w szczególności niższa temperatura powietrza (-0,4°C) i niższe ciśnienie atmosferyczne (1015,0 hPa). Wilgotność względna powietrza (81%) i prędkość wiatru (5,5 km/h) były zbliżone. Stężenie pyłu $PM_{2,5}$ w powietrzu zewnętrznym było znacznie wyższe, aniżeli w trakcie pomiarów serii 1 i 2 i średnio wyniosło 42,8 μg/m^3. Na znacząco wyższym poziomie kształtowało się również stężenia pyłu $PM_{2,5}$ w kotłowni, przy czym nieco inny był charakter przebiegu ich zmienności, aniżeli w trakcie pierwszego dnia pomiarowego. Stężenia, choć początkowo również wysokie (rzędu 100-150 μg/m^3) w trakcie pierwszych 10-15 minut trwania badania wzrosły do poziomu 300-400 μg/m^3. Następnie systematycznie malały, aby w końcowej części pomiaru osiągnąć poziom wyjściowy, tj. ok. 100 μg/m^3.



Rysunek 45 Przebieg zmienności stężeń pyłów $PM_{2,5}$ wewnątrz kotłowni i w powietrzu zewnętrznym w trakcie pomiarów serii 3 i 4

8. Wyniki analiz w zakresie zawartości części palnych w żużlu

W czasie prowadzenia badań dla każdej z serii pomiarowych pobrano próbkę żużla z dolnej części kotła celem dalszego jej poddania analizie pod kątem zawartości części palnych. Aby zapobiec wpływowi wyników analiz w poszczególnych seriach na skład żużla przed każdą serią pomiarową kocioł był czyszczony tj.:

- Usuwany był osad ze ścianek kotła;
- Opróżniana była szuflada popielnika.

Po zakończeniu każdej serii całość materiału znajdującego się w popielniku pobierana była jako próbka do badań. Badania w przywołanym zakresie prowadzono w Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki, o którym była mowa w rozdziale 4.

Zbiorcze wyniki analiz przedstawiono w tabeli 15, zaś wyniki szczegółowe wraz z protokołami i sprawozdaniami z badań laboratoryjnych zamieszczone w załączniku 3 (w odniesieniu osobno do każdej z serii 1-4 w przypadku paliwa marki [XXX]) oraz w załączniku 4 (w odniesieniu do połączonych próbek z serii 5-6 w przypadku paliwa marki [YYY]).

Tabela 15 Zbiorcze wyniki dotyczące zawartości części palnych w próbkach żużla pobranego z dolnej części kotła

Parametr	Jednostka	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5 i 6

Zawartość części palnych	%	51,45	54,78	67,26	40,83	39

Uzyskane wyniki wskazują na bardzo wysokie zawartości części palnych w analizowanych próbkach w szczególności w odniesieniu do węgla [XXX]. Należy też mieć na względzie, że oznaczona zawartość popiołu w tym węglu ([XXX]) jest na bardzo wysokim poziomie. Zaobserwowana wysoka zawartość części palnych z żużlu świadczy o nieprawidłowym procesie spalania paliwa (które nie ulega całkowitemu spaleniu) oraz skutkuje wysoką wartością straty niecałkowitego spalania.

9. Obliczenia bilansowe kotła

9.1. Bilans obiegu powietrzno-spalinowego – sposób realizacji obliczeń

Obliczenia bilansowe po stronie obiegu powietrzno-spalinowego kotła realizowane są w kilku etapach i obejmują m.in.:

- Obliczeniowe określenie ilości i składu powstających spalin (głównie: objętość suchych gazów trójatomowych, objętość pary wodnej);
- Wyznaczenia zależności entalpii spalin w funkcji ich temperatury oraz współczynnika nadmiaru powietrza;
- Obliczeniowe określenie sprawności pracy kotła – określenie głównych strat ciepła;
- Wyznaczenie obliczeniowej ilości spalanego paliwa;
- Wyznaczenie teoretycznej temperatury spalania.

W celu realizacji obliczeń, o których mowa powyżej, konieczne jest przygotowanie zestawu danych wejściowych, odnoszących się zarówno do konstrukcji kotła jak i jego parametrów operacyjnych. Do podstawowych parametrów operacyjnych kotła niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń jego układu powietrzno-spalinowego należą m.in.

- Moc użyteczna kotła [kW];
- Temperatura wody zasilającej [˚C];
- Temperatura wody powrotnej [˚C];
- Przepływ wody [kg/s];
- Temperatura spalin wylotowych [˚C];
- Temperatura powietrza zewnętrznego [˚C];
- Współczynnik nadmiaru powietrza w spalinach [%].

Dodatkowo niezbędne dla realizacji obliczeń bilansowych są informacje dotyczące parametrów stosowanego paliwa takie jak:

- Skład paliwa;
- Wartość opałowa paliwa.

Szczegółowe informacje w tym zakresie przedstawiono we wcześniejszych rozdziałach pracy. W dalszej części rozdziału przedstawiono główne informacje dotyczące sposobu prowadzenia obliczeń bilansowych w odniesieniu do analizowanego kotła.

9.1.1. Obliczeniowe określenie ilości oraz składu powstających spalin

Jak już wcześniej wspomniano, w pierwszej części procesu obliczeniowego określane są podstawowe parametry charakteryzujące stan pracy kotła, dla którego prowadzone są obliczenia tj.:

- Ilość i skład powstających spalin;
- Sprawność cieplna kotła poprzez określenie głównych strat ciepła;
- Obliczeniowy strumień spalanego paliwa.

W celu określenia ilości i składu powstających spalin, dla założonego składu paliwa wyznaczane są kolejno:

- Wartość opałowa paliwa:

$$\mathrm{Q_w} = 4{,}187\left(81C + 290\left(H - \frac{O}{8}\right) + 25S - 6W_r\right) \quad [\frac{kJ}{kg}]$$

- Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza zużywanego do spalenia węgla V_p^t:

$$V_p^t = 0{,}0889(C + 0{,}375S) + 0{,}265H - 0{,}0333O \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

W celu wyznaczenia współczynnika nadmiaru powietrza, przy jakim prowadzone jest spalanie, wykorzystuje się informację o rzeczywistym stężeniu dwutlenku węgla w spalinach.

Przy spalaniu stechiometrycznym otrzymuje się maksymalną zawartość CO_2 w spalinach oznaczaną jako CO_2max. Jest to wielkość charakterystyczna każdego paliwa, którą dla wykorzystywanego paliwa wyznaczono z zależności uwzględniającej skład pierwiastkowy paliwa stałego wyrażony w procentach.

$$CO_{2\max} = \frac{21 \cdot C}{C + 2{,}37\left(H - \frac{O - S}{8}\right)} \quad [\%]$$

$$\lambda = \frac{CO_{2maX}}{CO_2}$$

Następnie, wyznaczana jest rzeczywista objętość poszczególnych (głównych) składników spalin oraz objętość całkowita spalin z następujących zależności:

- Objętość spalin trójatomowych dwutlenku węgla i dwutlenku siarki V_{RO_2}

$$V_{RO_2} = 0{,}01866(C + 0{,}375S) \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

- Rzeczywista objętość azotu w spalinach V_{N_2}

$$V_{N_2} = 0{,}79 * V_p^t \cdot \lambda + 0{,}8\frac{N}{100} \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

- Rzeczywista objętość tlenu w spalinach V_{O_2}

$$V_{O_2} = 0{,}21 * (\lambda - 1) * V_p^t \cdot \lambda \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

- Rzeczywista objętość pary wodnej w spalinach V_{H_2O}

$$V_{H_2O} = 0{,}111H + 0{,}0124W + 0{,}0161 \cdot V_p^t \cdot \lambda \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

- Całkowita objętość spalin V_{sp}

$$V_{sp} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} \quad [\frac{m^3{}_n}{kg_{pal}}]$$

9.1.2. Obliczeniowe określenie sprawności kotła i strumienia spalanego paliwa

W kolejnym kroku procesu obliczeniowego, można wyznaczyć obliczeniową sprawność kotła z równania:

$$\eta = 100 - (S_w + S_{nc} + S_{nz} + S_f + S_o) \quad [\%]$$

gdzie:
S_w – strata wylotowa,
S_{nc} – strata niecałkowitego spalania,
S_{nz} – strata niezupełnego spalania,
S_f – strata w fizycznym cieple żużla i popiołu lotnego,
S_o – strata do otoczenia.

W tym celu konieczne jest wyznaczenie strat ciepła występujących podczas pracy kotła. Podejście takie nazywane jest określaniem sprawności metodą pośrednią. Prezentowany sposób obliczeń w tym zakresie zgodny jest z wytycznymi zawartymi w Polskiej Normie PN-72/M-34128. Określenie sprawności tą metodą polega na wyznaczeniu sumy strat cieplnych wyrażonych w procentach odniesionych do ciepła doprowadzonego do kotła (układu kogeneracyjnego). Do obliczeń cieplnych wykorzystano własny program narzędziowy do sporządzania bilansu kotła pod nazwą „Komora".

Główną, najważniejszą stratą jest strata wylotowa S_w. Strata ta jest związana z faktem usuwania z układu spalin o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia. Może ona zostać wyznaczona z poniższego równania.

$$S_w = \frac{\left(V_{sps} \cdot c_{sp} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O}\right)\left(t_{sp} - t_o\right)}{W_u} 100 \qquad [\%]$$

gdzie:
W_u – wartość opałowa masy roboczej paliwa,
t_{sp} - temperatura spalin wylotowych,
t_o - temperatura odniesienia (otoczenia),
c_{sps} - ciepło właściwe spalin suchych,

c_{H_2O} - ciepło właściwe pary wodnej.

Wyznaczenie straty niecałkowitego spalania można zrealizować z następujących poniższych równań. Co do zasady składa się ona z dwóch strat tj. straty niedopału w żużlu oraz w popiele lotnym. Strata niedopału w żużlu może być wyznaczona z poniższego równania:

$$S_{\dot{z}} = \frac{a_{\dot{z}} \cdot A^r \cdot \frac{C_{\dot{z}}}{100 - C_{\dot{z}}} \cdot 33829}{W_u} \quad [\%]$$

Strata niedopału w popiele lotnym może natomiast zostać wyznaczona z następującego równania:

$$S_p = \frac{a_{pl} \cdot A^r \cdot \frac{C_p}{100 - C_p} \cdot 33829}{W_u} \quad [\%]$$

Zatem strata niecałkowitego spalania stanowiąca sumę powyższych strat może być wyznaczona z następującego równania:

$$S_{nc} = S_{\dot{z}} + S_p \quad [\%]$$

Strata niecałkowitego spalania związana jest z pozostałością niespalonych cząstek węgla w żużlu i popiele lotnym. Przy prawidłowo prowadzonym procesie spalania wymiar tej straty powinien być niewielki.

Wyznaczenie straty niezupełnego spalania, przy uwzględnieniu zawartości CO i CH_4 w spalinach może być dokonane z równania:

$$S_{nz} = \frac{V_{sps}\left(12644 \cdot CO + 35672 \cdot CH_4\right)}{W_u} \quad [\%]$$

Wyznaczenie straty w fizycznym cieple żużla i popiołu lotnego.

Strata w fizycznym cieple żużla:

$$S_{f\dot{z}} = \frac{a_{\dot{z}} \cdot A^r}{W_u} \cdot \frac{1}{1 - \frac{c_{\dot{z}}}{100}} \cdot c_{p\dot{z}} \cdot t_{\dot{z}} \quad [\%]$$

Strata w fizycznym cieple popiołu lotnego:

$$S_{fp} = \frac{a_{pl} \cdot A^r}{W_u} \cdot \frac{1}{1 - \frac{c_p}{100}} \cdot c_{pp} \cdot \left(t_{spw} - t_o\right) \quad [\%]$$

Zatem w fizycznym cieple żużla i popiołu lotnego stanowiąca sumę powyższych strat może być wyznaczona z następującego równania:

$$S_f = S_{f\dot{z}} + S_{fp} \quad [\%]$$

gdzie:

$t_{\dot{z}}$ - średnia temperatura żużla,

$c_{pż}$, c_{pp} - ciepło właściwe żużla i popiołu lotnego.

Typowe, przykładowe wartości straty niezupełnego spalania oraz niecałkowitego spalania dla różnego rodzaju palenisk stosowanych w dużych kotłach energetycznych przedstawiono w tabelach 16-17.

Tabela 16 Przykładowe, typowe wartości straty niezupełnego spalania S_{nz} dla różnego rodzaju palenisk [Orłowski P. Dobrzański W., Szwarc E., Kotły parowe. Konstrukcja i obliczenia. Warszawa : Wydaw. Nauk.-Techn., 1979.]

Rodzaj paleniska	S_{nz} [%]
Z ręcznym rusztem płaskim przy spalaniu węgla kamiennego	3-5
Z ręcznym rusztem schodkowym przy spalaniu węgla brunatnego	2-3
Z rusztem taśmowym przy spalaniu węgla kamiennego i brunatnego	1
Z rusztem taśmowym i pneumonarzutem przy spalaniu węgla kamiennego i brunatnego	0,5
Z rusztem pochyłym, mechanicznym przy spalaniu węgla brunatnego	1
Pyłowe przy spalaniu węgla kamiennego i brunatnego	0,5
Pyłowe na ciekły żużel	0
Gazowe i olejowe	0,5-1,5

Tabela 17 Przykładowe, typowe wartości straty niecałkowitego spalania (popielnikowe) S_{nc} oraz współczynnik przechwytu popiołu $a_ż$ [Orłowski P. Dobrzański W., Szwarc E., Kotły parowe. Konstrukcja i obliczenia. Warszawa : Wydaw. Nauk.-Techn., 1979.]

Paleniska		S_{nc} [%]	$a_ż$ [%]
Z rusztem ręcznym płaskim	Węgiel brunatny	7-11	0,75
	Węgiel kamienny, sortowany	6-7	0,70-0,80
	Antracyt	14	0,70
Z rusztem ręcznym płaskim i pneumonarzutem	Antracyt	18	0,65
Z rusztem taśmowym	Węgiel kamienny	4-6	0,80
	Antracyt	14	0,70
Z rusztem taśmowym i pneumonarzutem	Węgiel kamienny	6-7	0,75
Z rusztem pochyłym mechanicznym	Węgiel brunatny	6	0,80
Pyłowe	Antracyt	4-6	0,05-0,10
	Chudy węgiel kamienny	2	0,10

	Węgiel kamienny, części lotnych < 25%	2	0,10
	Węgiel kamienny, części lotnych > 25%	1,5	0,10
	Węgiel brunatny	0,5-1	0,10
Szybowe	Węgiel kamienny	4	0,15
	Węgiel brunatny	1	0,15
Olejowe, gaz ziemny		1-1,5	-
Na gaz wielkopiecowy, spalanie w postaci pochodni		3	-
Na gaz wielkopiecowy, spalanie bez płomienia		1	-

Stratę do otoczenia dla kotłów energetycznych wyznacza się standardowo z poniższej zależności:

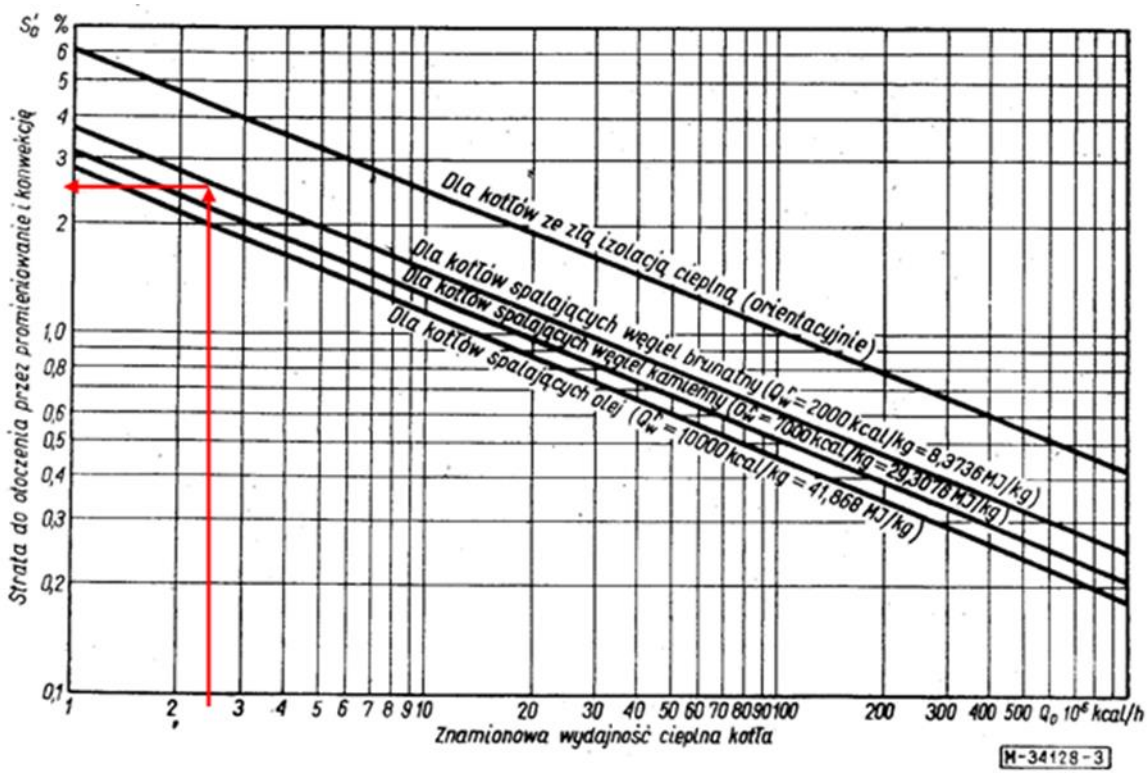
$$S_o = S_o^{'} \frac{Q_k^{'}}{Q_k} \quad [\%]$$

gdzie:

$S_o^{'}$ - strata do otoczenia przy znamionowej wydajności cieplnej kotła;

$Q_k^{'}$, Q_k - znamionowa i rzeczywista moc cieplna kotła.

Do wyznaczenia straty cieplnej do otoczenia przy znamionowej wydajności cieplne kotła dla kotłów energetycznych przez promieniowanie i konwekcję wykorzystuje się standardowo wykres zawarty w PN-72/M-34128-3, który przedstawiono na rysunku 46.



Rysunek 46 Strata do otoczenia przy znamionowej wydajności cieplnej kotła

W rozpatrywanym przypadku wykorzystano inną metodą wyznaczenia straty do otoczenia. Stratę tą wyznaczono na podstawie badań termowizyjnych oraz z wykorzystaniem oprogramowania Rockassist. Obliczenia realizowane przez ten program są zgodne z VDI 2055 i EN ISO 12241.

Program korzysta z ogólnych zależności opisujących procesy wymiany ciepła jak również doświadczeń obiektowych jego twórców.

Znając strumień wody przepływającej przez kocioł oraz temperaturę wody na zasilaniu kotła oraz na wyjściu z kotła (z pomiarów), określona może zostać moc użyteczna kotła ($Q_{użyteczna}$) z następującej zależności.

$$Q_{użyteczna} = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_{out} - t_{in}) \, [kW]$$

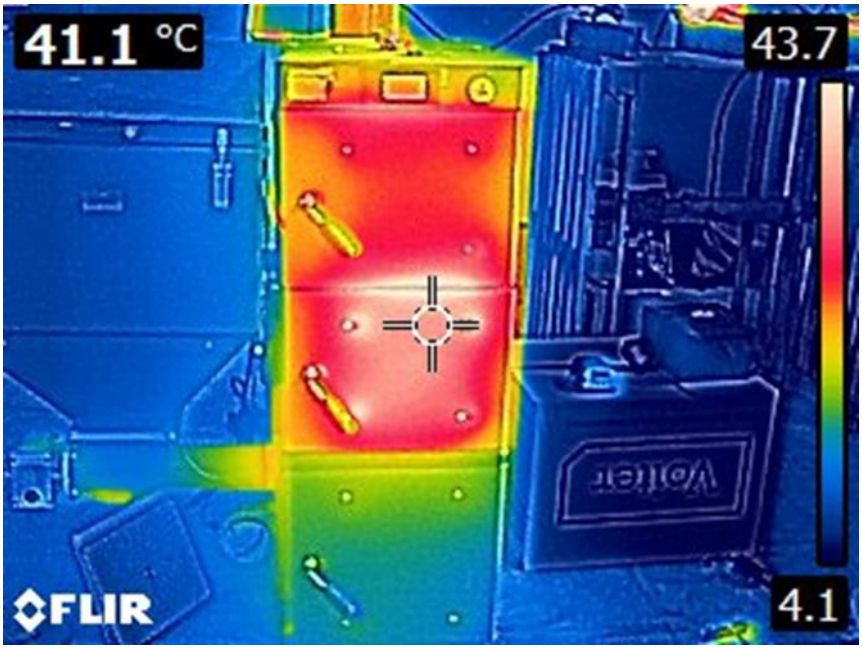
Dla wyznaczonej sprawności oraz mocy użytecznej kotła możliwe jest wyznaczenie rzeczywistego strumienia paliwa a następnie strumienia spalin. Dla obliczonego lub przyjętego za wynikiem pomiarów strumienia paliwa (B) oraz znanych wartości innych wyznaczonych wcześniej parametrów możliwe jest określenie rzeczywistego strumienia spalin z poniższej zależności.

$$V_{sp}{}^{r} = V_{sp} \cdot B \cdot (1 - \frac{S_{NZ}}{100}) \cdot 3600 \; [\frac{m^3{}_n}{h}]$$

9.1.3. Obliczeniowe określenie straty do otoczenia

Jak już wcześniej wspomniano w rozpatrywanym przypadku dla określenia strat ciepła do otoczenia wykonano w pierwszej kolejności ocenę rozkładu temperatury na powierzchni kotła w czasie

jego pracy, a następnie pozyskane dane w tym zakresie wraz z danymi geometrycznymi kotła wykorzystano do wyznaczenia straty do otoczenia przy użyciu oprogramowania Rockassist. Na poniższych zdjęciach (rysunki 47-49) przedstawiono przykładowe termogramy wykonane w czasie badan stanowiskowych.



Rysunek 47 Rozkład temperatury obudowy kotła (widok od frontu)

Rysunek 48 Rozkład temperatury obudowy kotła (widok od strony zasobnika)

Rysunek 49 Rozkład temperatury obudowy kotła (widok od strony bocznej)

Wyznaczone w przywołany sposób straty do otoczenia w czasie prowadzenia badań dla wszystkich serii były na porównywalnym poziomie i wynosiły ok. 300 W. Należy ocenić, że kocioł jest dobrze zaizolowany. Podwyższone straty występują przez drzwiczki rewizyjne. Jest to zapewne związane z brakiem obecności płaszcza wodnego w tym rejonie kotła oraz wysoką temperaturą spalin.

10. Wyniki obliczeń bilansowych obiegu powietrzno-spalinowego analizowanego kotła dla wszystkich serii pomiarowych

Stosując podejście opisane szczegółowo w rozdziale 9 dokonano obliczeń bilansowych analizowanego kotła celem wyznaczenia jego parametrów operacyjnych m.in.:

- Mocy użytecznej kotła;
- Obliczeniowej wartości opałowej paliwa;
- Współczynnika nadmiaru powietrza;
- Stechiometrycznego zapotrzebowania powietrza;
- Rzeczywistej objętości powietrza;
- Całkowitej objętości spalin;
- Straty wylotowej;
- Straty niezupełnego spalania;
- Straty niecałkowitego spalania;
- Straty w fizycznym cieple ubocznych produktów spalania;
- Straty do otoczenia;
- Sprawności cieplnej kotła.

Zestawienie wyników obliczeń w powyższym zakresie przedstawiono w tabelach 18-21 dla wszystkich analizowanych stanów pracy kotła wykorzystującego ekogroszek [XXX] tj. serii pomiarowych 1-4

Tabela 18 Wyniki obliczeń dla pierwszej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	*kg/h*	2,1
2	Średnia moc cieplna kotła	Q_C	kW	9,7
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	W_u	*MJ/kg*	24,96
4	Temperatura otoczenia	t_{po}	°C	10
5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	t_{spw}	°C	79,35
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	C_n	%	51,45
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	3,51
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm^3/kg	6,42
9	Rzeczywista objętość powietrza	V_p	Nm^3/kg	22,56
10	Objętość spalin suchych	V_{sps}	Nm^3/kg	22,42
11	Objętość pary wodnej	V_{H2O}	Nm^3/kg	0,88
12	Całkowita objętość spalin	V_{sp}	Nm^3/kg	23,3
13	Strata wylotowa	S_w	%	8,8
14	Strata niecałkowitego spalania	S_{nc}	%	21,22
15	Strata niezupełnego spalania	S_{nz}	%	2,08
16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	S_{fc}	%	0,1
17	Strata do otoczenia	S_o	%	2
18	Suma strat	$\sum S$	%	34,2
19	Średnia sprawność kotła	η_{EC}	%	65,8

Tabela 19 Wyniki obliczeń dla drugiej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	*kg/h*	1,91
2	Średnia moc cieplna kotła	Q_C	kW	9,04
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	W_u	*MJ/kg*	24,96
4	Temperatura otoczenia	t_{po}	°C	10

5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	t_{spw}	°C	61,4
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	C_n	%	54,78
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	2,31
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm^3/kg	6,42
9	Rzeczywista objętość powietrza	V_p	Nm^3/kg	14,84
10	Objętość spalin suchych	V_{sps}	Nm^3/kg	14,7
11	Objętość pary wodnej	V_{H2O}	Nm^3/kg	0,76
12	Całkowita objętość spalin	V_{sp}	Nm^3/kg	15,46
13	Strata wylotowa	S_w	%	4,3
14	Strata niecałkowitego spalania	S_{nc}	%	24,26
15	Strata niezupełnego spalania	S_{nz}	%	1,38
16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	S_{fc}	%	0,11
17	Strata do otoczenia	S_o	%	2,2
18	Suma strat	$\sum S$	%	32,25
19	Średnia sprawność kotła	η_{EC}	%	67,75

Tabela 20 Wyniki obliczeń dla trzeciej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	*kg/h*	3,9
2	Średnia moc cieplna kotła	Q_C	kW	11,52
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	W_u	*MJ/kg*	24,96
4	Temperatura otoczenia	t_{po}	°C	10
5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	t_{spw}	°C	70,7
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	C_n	%	67,26
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	5,53
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm^3/kg	6,42
9	Rzeczywista objętość powietrza	V_p	Nm^3/kg	35,54

10	Objętość spalin suchych	V_{sps}	Nm^3/kg	35,41
11	Objętość pary wodnej	V_{H2O}	Nm^3/kg	1,09
12	Całkowita objętość spalin	V_{sp}	Nm^3/kg	36,5
13	Strata wylotowa	S_w	%	12
14	Strata niecałkowitego spalania	S_{nc}	%	41,14
15	Strata niezupełnego spalania	S_{nz}	%	3,26
16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	S_{fc}	%	0,16
17	Strata do otoczenia	S_o	%	1,1
18	Suma strat	$\sum S$	%	57,66
19	Średnia sprawność kotła	η_{EC}	%	42,34

Tabela 21 Wyniki obliczeń dla czwartej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	*kg/h*	6,2
2	Średnia moc cieplna kotła	Q_C	kW	13,88
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	W_u	*MJ/kg*	24,96
4	Temperatura otoczenia	t_{po}	°C	10
5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	t_{spw}	°C	104,45
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	C_n	%	40,83
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	13,46
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm^3/kg	6,42
9	Rzeczywista objętość powietrza	V_p	Nm^3/kg	86,5
10	Objętość spalin suchych	V_{sps}	Nm^3/kg	86,37
11	Objętość pary wodnej	V_{H2O}	Nm^3/kg	1,91
12	Całkowita objętość spalin	V_{sp}	Nm^3/kg	88,28
13	Strata wylotowa	S_w	%	45,58
14	Strata niecałkowitego spalania	S_{nc}	%	13,82
15	Strata niezupełnego spalania	S_{nz}	%	7,9

16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	S_{fc}	%	0,09
17	Strata do otoczenia	S_o	%	0,7
18	Suma strat	$\sum S$	%	68,09
19	Średnia sprawność kotła	η_{EC}	%	31,91

Zestawienie wyników obliczeń w zakresie bilansu energetycznego kotła dla serii 5 i 6, w których kocioł pracował z wykorzystaniem ekogroszku [YYY] przedstawiono w tabelach 22-23.

Tabela 22 Wyniki obliczeń dla piątej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	kg/h	1,86
2	Średnia moc cieplna kotła	QC	kW	11,44
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	Wu	MJ/kg	26,16
4	Temperatura otoczenia	tpo	°C	10
5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	tspw	°C	62,4
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	Cn	%	39
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	3,29
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm^3/kg	6,75
9	Rzeczywista objętość powietrza	Vp	Nm^3/kg	22,23
10	Objętość spalin suchych	Vsps	Nm^3/kg	22,07
11	Objętość pary wodnej	VH2O	Nm^3/kg	0,97
12	Całkowita objętość spalin	Vsp	Nm^3/kg	23,04
13	Strata wylotowa	Sw	%	6,27
14	Strata niecałkowitego spalania	Snc	%	4,79
15	Strata niezupełnego spalania	Snz	%	2,0
16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	Sfc	%	0,05
17	Strata do otoczenia	So	%	2,2
18	Suma strat	∑S	%	15,3
19	Średnia sprawność kotła	ηEC	%	84,7

Tabela 23 Wyniki obliczeń dla szóstej serii pomiarowej

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Wartość
1	Obliczeniowy strumień paliwa	B	kg/h	2,21
2	Średnia moc cieplna kotła	QC	kW	12,57
3	Obliczeniowa wartość opałowa paliwa	Wu	MJ/kg	26,16
4	Temperatura otoczenia	tpo	°C	10
5	Średnia temperatura spalin na wylocie z kotła	tspw	°C	93,6
6	Udział niespalonego pierwiastka węgla w żużlu	Cn	%	39
7	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	- -	4,59
8	Stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza	V_p^t	Nm3/kg	6,75
9	Rzeczywista objętość powietrza	Vp	Nm^3/kg	31,01
10	Objętość spalin suchych	Vsps	Nm^3/kg	30,86
11	Objętość pary wodnej	VH2O	Nm^3/kg	1,11
12	Całkowita objętość spalin	Vsp	Nm^3/kg	31,97
13	Strata wylotowa	Sw	%	13,94
14	Strata niecałkowitego spalania	Snc	%	4,79
15	Strata niezupełnego spalania	Snz	%	1,35
16	Strata w fizycznym cieple stałych produktów spalania	Sfc	%	0,05
17	Strata do otoczenia	So	%	1,9
18	Suma strat	∑S	%	22,03
19	Średnia sprawność kotła	ηEC	%	77,97

W czasie wszystkich serii pomiarowych sterownik kotła dobierał jego podstawowe nastawy takie jak:

- Czas podawania paliwa;
- Czas przerwy w podawaniu paliwa;
- Prędkość obrotowa wentylatora podmuchowego (dmuchawy);

w sposób automatyczny bez ingerencji operatora. Operator nastawiał jedynie zadaną temperaturę wody na wyjściu z kotła oraz dla każdej z serii pomiarowych zmieniane było położenie kierownicy wlotowej do wentylatora podmuchowego powietrza, pomiędzy stanem całkowitego otwarcia (seria 4) a stanem jej całkowitego zamknięcia (seria 2).

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że:

- W przypadku całkowitego zamknięcia kierownicy wlotowej wentylatora podmuchowego powietrza osiągane wartości współczynnika nadmiaru powietrza pozostawały na prawidłowym poziomie (ok. 2). Wraz ze zmianą położenia tej kierownicy na coraz bardziej otwartą współczynnik nadmiaru powietrza rósł, osiągając w serii 4 karykaturalną wartość;
- Temperatura spalin na wylocie z kotła we wszystkich seriach pomiarowych pozostawała na zbliżonym oraz niskim poziomie wynoszącym od 60 do 100°C;
- Dla serii pomiarowych, w czasie których spalanie prowadzone było z wysoką wartością współczynnika nadmiaru powietrza, pomimo niskiej notowanej temperatury spalin, odnotowano wysoką lub bardzo wysoką stratę wylotową;
- Dla wszystkich serii pomiarowych, w których wykorzystywany był ekogroszek [XXX] (serie 1-4) odnotowano zaskakująco wysoką stratę niecałkowitego spalania, związaną z bardzo dużym udziałem niespalonego węgla w stałej pozostałości po procesie spalania (40-60%). Zdaniem autorów stan taki może być wynikiem m.in. parametrów paliwa tj. ponad dwukrotnie wyższej od deklarowanej zawartości popiołu w paliwie oraz podwyższonej tendencji do spiekania popiołu. W czasie badań dla wszystkich serii pomiarowych, niezależnie od bieżących nastaw parametrów operacyjnych kotła, obserwowano tworzenie się spieków. Zjawisko takie sprzyja nieprawidłowemu wypalaniu paliwa i podwyższaniu zawartości części palnych w żużlu. To z kolei prowadzi do bardzo znaczącego obniżenia sprawności kotła;
- W czasie badań z wykorzystaniem ekogroszku [XXX] najwyższa uzyskana sprawność kotła nie przekroczyła 70%. Jest to wartość dalece niższa od deklarowanej przez producenta kotła. Jak już wcześniej wspomniano największą stratą (dla większości serii pomiarowych) okazała się strata niecałkowitego spalania. Typowo dominującą stratą w kotłach energetycznych jest strata wylotowa. Uzyskane wyniki nie świadczą o niemożliwości technicznej uzyskania wyższej sprawności przedmiotowego kotła. Dowodzą natomiast, że w czasie ruchu z automatycznym doborem nastaw, spalając testowe paliwo nie dało się uzyskać wyższej sprawności.
- Dla serii pomiarowych, w których wykorzystywano ekogroszek [YYY] (serie 5 i 6) strata niecałkowitego spalania była znacząco niższa niż w czasie serii 1-4. Pozwoliło to uzyskać znacząco wyższą sprawność termiczną kotła. Najwyższą sprawność kotła uzyskano w czasie realizacji serii 5. Wyniosła ona prawie 85%, co jest bliskie parametrom kotła określonym przez jego producenta.

11. Opinia ekspercka

Niniejsza opinia została wykonana w oparciu o wyniki analiz składu paliwa oraz pozostałości stałych (żużla) powstałych po procesie spalania, jak również wyniki pomiarów stężeń wybranych rodzajów zanieczyszczeń, w tym w szczególności zanieczyszczeń, dla których standardy zostały określone w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. określającej ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią.

11.1. Opis warunków technicznych badania, wskazujący na jego prawidłowość i miarodajność

Prawidłowa realizacja techniczna badań w przedmiotowym zakresie wymagała podjęcia działań prowadzących w szczególności do:

- Zaprojektowania oraz wybudowania stanowiska badawczego wyposażonego, poza kotłem, we wszystkie niezbędne układy towarzyszące tj. układ wyprowadzania i rozpraszania ciepła wyposażony m.in. w pompę obiegową, układ stabilizacji ciśnienia oraz nagrzewnicę powietrza, jak również układ wyprowadzania spalin obejmujący głównie komin o wysokości i przekroju zgodnym z zaleceniami producenta kotła;
- Realizacji badań na stanowisku poprzez wykwalifikowany personel z wykorzystaniem adekwatnej do podejmowanych prac aparatury pomiarowej;
- Realizacji badań w kilku seriach pomiarowych oraz zapewnienia odpowiedniego czasu trwania każdej serii celem wyeliminowania z oceny stanów niestabilnej pracy układu.

W trakcie przygotowywania i realizacji badań stanowiskowych wszystkie powyższe warunki zostały wypełnione, tj.:

- Projekt oraz wykonanie stanowiska badawczego zrealizowały osoby posiadające stosowne uprawnienia w zakresie eksploatacji i dozoru urządzeń, instalacji i sieci cieplnych;
- Badania zostały zrealizowane przez wykwalifikowany personel – pracowników naukowych Politechniki Warszawskiej oraz Szkoły Głównej Służby Pożarniczej – posiadających wieloletnie, adekwatne doświadczenie oraz dysponujących niezbędną aparaturą pomiarową. Analizy składu paliwa oraz pozostałości stałej po procesie spalania, jak również analizy składu chemicznego pyłu wykonały profesjonalne laboratoria, posiadające stosowne akredytacje;
- W celu uniknięcia wpływu krótkotrwałych zmian stabilności pracy opomiarowanego układu na wyniki badań, zaplanowanych zostało 6 serii pomiarowych, których czas trwania wynosił minimum 90 minut.

Należy zatem uznać, że przeprowadzone badania w kontekście celu, jaki im przyświecał (oceny parametrów pracy kotła zasilanego dwoma typami ekogroszku w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych), zostały zrealizowane w sposób prawidłowy i miarodajny.

11.2. Objaśnienie możliwości technicznych zainstalowania kotła 5 klasy przez konsumenta zgodnie z instrukcją oraz wskazanie przykładów typowych i częstych nieprawidłowości pojawiających się przy instalacji

Co do zasady, zgodnie z instrukcją użytkowania kotła, który był wykorzystany w procesie badawczym, instalacja tego typu urządzenia powinna być wykonana przez osoby posiadające w tym zakresie odpowiednie kwalifikacje i doświadczenie. Dotyczy to zarówno podłączenia do instalacji centralnego ogrzewania w budynku, jak również podłączenia do emitora (komina), odprowadzającego spaliny do powietrza atmosferycznego.

Z reguły podłączenie hydrauliczne kotła nie powinno być źródłem większych problemów i czynność taką potrafi wykonać większość hydraulików. Osoba nieposiadająca w tym zakresie żadnego doświadczenia nie powinna jednak wykonywać tych czynności.

Drugi aspekt, związany z odpowiednim połączeniem kotła z przewodem kominowym zdecydowanie powinien być wykonany przez wykwalifikowany personel, co jest nie tylko związane z zapewnieniem prawidłowej pracy kotła, ale również z późniejszym bezpieczeństwem jego użytkowników. Niewłaściwe połączenie kotła z emitorem lub zastosowanie niewłaściwego przewodu kominowego (materiał nieodporny na wysokie temperatury, zbyt krótki lub o zbyt wąskim przekroju przewód kominowy) może skutkować trudnością w wytworzeniu się odpowiedniego ciągu

kominowego, a co za tym idzie niewystarczająco skutecznym wyprowadzaniem spalin poza kotłownię i możliwość kumulowania się szkodliwych dla zdrowia substancji w otoczeniu paleniska, czy też ich przenikania do innych części budynku. Ogólnie przyjęta zasada związana z odpowiednim podłączeniem kotła do emitora dotyczy średnicy i wysokości przewodu kominowego. Średnica nie może być niższa, aniżeli średnica czopucha w kotle, bowiem w przeciwnym razie spaliny mogłyby się cofać do paleniska. Odpowiednia musi być również wysokość emitora, zapewniająca wytworzenie się właściwego ciągu kominowego. W przypadku przedmiotowego kotła zapewniono, aby średnica komina była większa o 100 mm od średnicy czopucha. Producent kotła wymaga, aby długość przewodu kominowego wynosiła minimum 4,6 m, jednak w omawianym przypadku, m.in. ze względu na znaczną liczbę tzw. zawirowywaczy spalin, znajdujących się powyżej paleniska, zapewniono wyraźnie większe wymiary przewodu kominowego (8 m).

Mając na uwadze, że prace instalacyjne powinny być wykonywane przez odpowiednich specjalistów, wydaje się, że większa uwaga powinna być zwrócona na kwestie związane z odpowiednią eksploatacją kotła węglowego, gdzie konsument jest już zdany na siebie (i ewentualnie instrukcję obsługi kotła). Kocioł węglowy wymaga odpowiedzialnego i świadomego sterowania. Niestety przeciętny użytkownik takiego kotła nie jest z reguły do tego przygotowany, o ile nie posiada wcześniejszego doświadczenia z korzystania z tego typu urządzenia. Mimo faktu, że kocioł, który został zastosowany w przedmiotowych badania jest kotłem z automatycznym podajnikiem paliwa, wyposażonym w możliwość elektronicznego jego sterowania, nie posiada on możliwości kontrolowania niektórych kluczowych parametrów, a tym bardziej możliwości sterowania tymi parametrami. Przykładowo, kocioł nie posiada wbudowanej sondy lambda, wskutek czego nie oferuje możliwości kontrolowania, ani mierzalnej przez konsumenta zmiany współczynnika nadmiaru powietrza. W efekcie, nawet mimo pewnego doświadczenia użytkownika, podejmowanie w pełni świadomych decyzji w zakresie sterowania kotłem, nie jest możliwe, bowiem algorytm sterowania kotłem nie uwzględnia niektórych parametrów. Z tego względu, w pewnym stopniu, sterowanie takim kotłem odbywa się niejednokrotnie na zasadzie prób i błędów, poprzez obserwowanie płomienia (jego barwy i wysokości w palenisku), spalin wydostających się u wylotu z komina, czy pozostałości stałych powstających w wyniku procesu spalania. Możliwość zautomatyzowanego sterowania temperaturą wody na wyjściu z kotła, mocą dmuchawy, czasem podawania paliwa, czy czasem przerw w podawaniu paliwa nie niweluje możliwości powstawania pewnych błędów, skutkujących ograniczoną sprawnością (przynajmniej czasowo) kotła i podwyższoną emisją zanieczyszczeń (nie wspominając o ograniczonej możliwości efektywnego podgrzania wody obiegowej). Na te problemy użytkowe związane z samym kotłem nakładają się dodatkowe możliwe mankamenty samego paliwa, jak np. zbyt duża zawartość części mineralnych (popiołu), czy tendencja do spiekania. Co prawda nie można jednoznacznie stwierdzić, że osiągnięcie parametrów emisyjnych, jak i operacyjnych na zadowalającym poziomie jest niemożliwe, ale ze względu na brak narzędzi po stronie konsumenta, które umożliwiałyby sterowanie wszystkimi kluczowymi parametrami kotła, w szczególności umożliwiającymi dostosowanie nastaw kotła do parametrów jakościowych węgla, wydaje się, że szanse na osiągnięcie właściwych warunków pracy w codziennej eksploatacji są nieznaczne.

Podczas eksploatacji kotła węglowego konsument powinien zwracać szczególną uwagę na następujące aspekty:

- Właściwe rozpalanie paleniska retortowego – przy niedostatecznym ciągu kominowym podczas rozpalania może dojść do znacznego zadymienia kotłowni, co stanowi dodatkowy czynnik narażający konsumenta na szkodliwe dla jego zdrowia zanieczyszczenia;

- Kocioł wymaga codziennej eksploatacji. Dotyczy to w szczególności należytego czyszczenia paleniska retortowego ze spieków, usuwania żużla z popielnika, czy usuwania nagromadzonego pyłu z sekcji zawirowywaczy spalin z nagromadzonego pyłu. W przypadku niedostatecznej uwagi przykładanej do tych aktywności, efektywność kotła będzie niska, co będzie powodować nie tylko zwiększoną emisję zanieczyszczeń do powietrza, ale również trudności eksploatacyjne związane z niedostateczną temperaturą wody obiegowej;
- Ze względu na wspomnianą powyżej konieczność okresowego czyszczenia (w warunkach eksploatacyjnych, w zależności od jakości stosowanego paliwa, powinno się to odbywać nie rzadziej niż raz na 2 tygodnie), niezbędne jest wyposażenie kotłowni w odpowiednio sprawną wentylację. Jest to związane zarówno z ograniczeniem możliwości pojawiania się zbyt dużych stężeń tlenku węgla (wskutek niewłaściwie pracującego kotła), jak również z faktem, że podczas czyszczenia kotła w pomieszczeniu kotłowni mogą pojawić się znaczne ilości pyłu;
- Ważne jest również zwracanie szczególnej uwagi na ilość paliwa w zasobniku, bowiem zbyt mała może spowodować cofnięcie się płomienia do podajnika, a tym samym wzrost zagrożenia pożarowego.

11.3. Opis paliwa użytego do przeprowadzenia badania

Zgodnie z zapisami umowy, o której mowa w rozdziale 1, przedmiotem badań był przede wszystkim węgiel kamienny sortymentu groszek, noszący powszechnie używaną nazwę handlową – ekogroszek, sygnowany marką [XXX]. W toku badań postanowiono zrealizować dodatkowo dwie serie z wykorzystaniem innego ekogroszku o nazwie [YYY].

Należy mieć na uwadze, że wspomniana nazwa „ekogroszek" jest jedynie nazwą handlową, którą wielu producentów węgla przeznaczonego dla celów grzewczych stosuje w odniesieniu do sortymentu groszek, cechującego się (zgodnie z deklaracjami producentów) polepszonymi kluczowymi parametrami paliwowymi (wartość opałowa) oraz obniżoną zawartością substancji zanieczyszczających jak siarka czy popiół. Według deklaracji producenta analizowany węgiel podstawowy tj. ekogroszek [XXX] powinien charakteryzować się następującymi parametrami:

- Granulacja: 5-31,5 mm;
- Wartość opałowa: 26-28 MJ/kg;
- Zawartość popiołu: max 7%;
- Zawartość siarki: max 0,6%;
- Zawartość wilgoci: max 15%;
- Udział podziarna: max 10%.

Wyniki analiz paliwa, wykonanych przez niezależne laboratorium, zostały przedstawione w rozdziale 4.1 oraz załączniku 1 niniejszego opracowania. W rozdziale 4.2 oraz w załączniku 2 przedstawiono z kolei wyniki analiz dotyczących drugiego z wykorzystywanych paliw, tj. ekogroszku marki [YYY].

11.4. Objaśnienie wpływu poszczególnych substancji chemicznych wykrytych w badaniu na zdrowie człowieka i na środowisko

W wyniku spalania paliw kopalnych, a w szczególności w przypadku paliw stałych, do których zalicza się węgiel, powstają w zróżnicowanych ilościach, zarówno substancje cechujące się brakiem bezpośredniego negatywnego wpływu na zdrowie człowieka (np. CO_2), jak również szereg substancji mogących stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka, ale również dla stanu środowiska

przyrodniczego. Generalnie zanieczyszczenia powietrza mają istotny wpływ na funkcjonowanie układu oddechowego i układu sercowo-naczyniowego, jednak szereg badań zrealizowanych w ostatnich latach wskazuje, że skutki narażenia na zanieczyszczenia powietrza dotyczą również układu nerwowego, czy naczyń mózgowych. Szereg zanieczyszczeń powietrza cechuje się również wysokim potencjałem kancerogenności – choćby zanieczyszczenia pyłowe, ale również obecne w ich składzie wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (a niejednokrotnie również inne substancje, jak np. polichlorowane dibenzodioksyny, czy polichlorowane dibenzofurany), są czynnikami zwiększającymi ryzyko zachorowania na choroby nowotworowe.

W przypadku części ze zidentyfikowanych w spalinach substancji znane są powszechnie związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy narażeniem, a występowaniem następstw zdrowotnych, w przypadku innych zaś takiej wiedzy brakuje lub jest ona niepełna. Mając na uwadze ograniczone możliwości szerokiego scharakteryzowania tych skutków w ramach niniejszej opinii, wyszczególnione zostaną tu te najważniejsze, związane przede wszystkim z tymi substancjami, dla których określone są standardy emisyjne, czy też ich dopuszczalne stężenia w powietrzu atmosferycznym. Szerszą charakterystykę tych skutków można znaleźć np. w następujących pracach:

- Mazurek H., Badyda A.: „Smog. Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczeń powietrza". Redakcja naukowa monografii, 212 s, ISBN 978-83-200-5575-7, PZWL Wydawnictwo Lekarskie, Warszawa 2018
- Jędrak J., Konduracka E., Badyda A.J., Dąbrowiecki P.: „Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie". ISBN 9788394306502, 144 s, Krakowski Alarm Smogowy, Kraków 2017
- Badyda A: „Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza pochodzenia komunikacyjnego na parametry sprawności wentylacyjnej mieszkańców Warszawy". Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska, nr 65, ISBN 978-83-7814-145-7, 182 s, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę wpływu na zdrowie wybranych substancji chemicznych, których obecność stwierdzono w strumieniu emisyjnym spalin podczas opisywanego badania:

- Tlenek węgla (CO) – jest bezbarwnym i bezwonnym gazem, powstającym (obok CO_2) wskutek spalania paliw stałych, płynnych i gazowych, głównie w efekcie tzw. spalania niezupełnego, czyli w sytuacji gdy nie może dojść do pełnego spalenia paliwa, np. wskutek wysokiej wilgotności, czy niedostatku powietrza (tlenu). W przypadku kotłów domowych istotne znaczenie dla powstawania CO ma sposób podawania paliwa – w kotłach z podajnikiem automatycznym emisja może być około 5-krotnie niższa, niż w przypadku ręcznego załadunku paliwa. Tlenek węgla jest najpowszechniej występującym zanieczyszczeniem gazowym o właściwościach toksycznych dla organizmu człowieka. Narażenie na oddychanie powietrzem zanieczyszczonym tlenkiem węgla w wysokich stężeniach jest związane z zaburzeniem prawidłowego procesu transportu tlenu we krwi. Wiąże się to z ok. 200-krotnie większym chemicznym powinowactwem CO do hemoglobiny w stosunku do tlenu. Wskutek takiego zjawiska zamiast oksyhemoglobiny powstaje karboksyhemoglobina, powodująca niedotlenienie organów, tkanek i komórek organizmu. Do skutków narażenia na oddychanie powietrzem zanieczyszczonym tlenkiem węgla należą uczucie duszności, zawroty głowy i zmniejszona wydolność organizmu, ale także zaburzenia wtórne, jak np. spadek możliwości percepcji oraz ogólnej sprawności psychicznej. Długotrwała ekspozycja na działanie tlenku

węgla wpływa negatywnie na metabolizm żelaza i witamin. Ponadto należy mieć na uwadze, iż osoby palące tytoń, mające generalnie wyższe stężenie karboksyhemoglobiny we krwi, są bardziej narażone na szkodliwe oddziaływanie tlenku węgla. Tlenek węgla należy do zanieczyszczeń, których emisja jest normowana zarówno w oparciu o normę PN-EN 303-5:2012, jak i Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe. W powietrzu atmosferycznym jego stężenia są normowane w oparciu o stosowne przepisy Unii Europejskiej (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszego powietrza dla Europy (Dz.U. L 152 z 11.6.2008, str. 1-44)) oraz przepisy krajowe (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2012, poz. 1031 z późn.zm.)), a rekomendacje w zakresie stężeń CO wydaje również Światowa Organizacja Zdrowia. Według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) CO jest jednym z sześciu podstawowych wskaźników jakości powietrza. Jak wskazano w punkcie 5.3 powyżej, w zależności od serii pomiarowej badanie wykazało średnią emisję tlenku węgla od ok. 1300 do ponad 3000 mg/Nm^{3}u (patrz rysunek 38) w stosunku do oczekiwanej wartości 500 mg/Nm^{3}u.

- Tlenki azotu – to grupa nieorganicznych substancji chemicznych, tworzących w sumie grupę 6 substancji (tlenek diazotu (N_2O), tlenek azotu (NO), ditlenek azotu (NO_2), tritlenek azotu (N_2O_3), tetratlenek azotu (N_2O_4) oraz pentatlenek azotu (N_2O_5)). Proces spalania paliw, zarówno ze źródeł stacjonarnych (energetyczne i przemysłowe spalanie paliw), jak i mobilnych (emisja z silników pojazdów mechanicznych) skutkuje emisją do powietrza przede wszystkim tlenku i ditlenku azotu. Ze względu na zdolność do przechodzenia jednego z nich w drugi (labilność) oznaczane są one razem jako tlenki azotu (NO_x). Tlenki azotu, jako mieszaninę, wyróżnia się, jako jeden z czynników związanych z negatywnym oddziaływaniem na roślinność. Ich podwyższona depozycja sprzyja zakwaszaniu gleb i wód, co może również prowadzić do zwiększonej eutrofizacji, czego skutkiem z kolei mogą być zmiany w zakresie bioróżnorodności. Pobieranie NO_x przez roślinność w nadmiarze prowadzić może do zaburzenia procesów fotosyntezy, jak również do nekrozy, czyli obumierania tkanek roślinnych. Dopuszczalna emisja mieszaniny tlenków azotu jest określona w standardach emisyjnych Rozporządzenia Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe. Z kolei w powietrzu atmosferycznym (w UE i Polsce, w oparciu o wspomniane wcześniej dokumenty) określone są dopuszczalne stężenia w odniesieniu do NO_2 (ze względu na ochronę zdrowia ludzi) oraz NO_x (ze względu na ochronę roślin). Swoje rekomendacje w odniesieniu do NO_2 posiada również WHO. Brak jest ich takich rekomendacji w przypadku NO, którego dopuszczalne stężenia nie są również regulowane w prawie krajowym i wspólnotowym. NO_2 jest według EPA jednym z sześciu podstawowych wskaźników jakości powietrza.
    - Tlenek azotu (NO) – jest, podobnie jak tlenek węgla, gazem bezbarwnym i bezwonnym, powstającym podczas spalania materii organicznej w wysokich temperaturach w wyniku reakcji tlenu z azotem, zaś w mniejszym stopniu wskutek utlenianiu azotu zawartego w paliwie. NO jest nietrwały i szybko utlenia się do NO_2, jednak ma podobny mechanizm oddziaływania na proces oddychania, jak w przypadku

CO. Wynika to przede wszystkim z wnikania tlenku azotu do układu krążenia i redukowania tlenu z oksyhemoglobiny, w efekcie czego powstaje nitrozohemoglobina.

- Ditlenek azotu (NO_2) – jest z kolei gazem brunatnym, gryzącym i cechującym się ostrym zapachem. NO_2 jest aktywniejszy i bardziej toksyczny niż NO. Powstaje wskutek utleniania tlenku azotu, w szczególności gdy następuje szybkie ochłodzenie spalin zawierających duże ilości wolnego tlenu. W znacznie mniejszym stopniu jest bezpośrednio emitowany w procesach spalania. Odgrywa jednak istotną rolę w procesie powstawania tzw. smogu fotochemicznego i jest ważnym źródłem formowania się kwasu azotowego w atmosferze. Ponadto nie rozpuszcza się w wodzie, co stanowi o jego wysokim potencjale negatywnego oddziaływania na organizm człowieka, ponieważ wskutek tego trafia bezpośrednio do pęcherzyków płucnych. Powoduje osłabienie funkcji obronnej płuc, sprzyjając powstawaniu infekcji wirusowych i bakteryjnych oraz stanów zapalnych. Może wpływać drażniąco na drogi oddechowe i powodować ostre choroby układu oddechowego, zwłaszcza u dzieci i osób chorujących na astmę oskrzelową. Przy bardzo dużych stężeniach może również wywoływać zapalenie oskrzeli, zapalenie płuc, a nawet przedwczesne zgony.

Jak wskazano w punkcie 5.3 powyżej, w zależności od serii pomiarowej badanie wykazało średnią emisję NO_x od ok. 420 do ponad 600 mg/Nm^{3}u (patrz rysunek 39), w stosunku do oczekiwanej wartości 350 mg/Nm^{3}u.

- Ditlenek siarki (SO_2) – jest bezbarwnym, ale silnie toksyczny gazem o gryzącym, duszącym zapachu. Powstaje podczas spalania paliw stałych i płynnych zawierających siarkę (w szczególności węgla). W przypadku procesów spalania zachodzących w paleniskach domowych, emisja SO_2 w największym zakresie zależy od rodzaju stosowanego paliwa. Ditlenek siarki jest ważnym źródłem formowania się kwasu siarkowego w atmosferze, wskutek czego bezpośrednio przyczynia się do działania fitotoksycznego. SO_2 wnika do organizmu rośliny (podobnie, jak NO_2) przez aparaty szparkowe, powodując m.in. zaburzenia równowagi oksydoredukcyjnej, prowadząc do zanikania chlorofilu, a co za tym idzie również do zaburzeń w przebiegu procesu fotosyntezy i w efekcie do ograniczenia asymilacji CO_2 z powietrza. Podobnie, jak tlenki azotu, sprzyja powstawaniu nekroz. Wskutek zakwaszania gleb i wód pobieranych przez roślinność, dochodzi również do wzrostu stężeń dostępnych dla roślin form metali ciężkich, powodujących uszkodzenia roślin. W przypadku narażenia ludzi na oddychanie powietrzem zanieczyszczonym SO_2 po wniknięciu w ściany dróg oddechowych ditlenek siarki przenika do krwi, kumuluje się w ściankach tchawicy, oskrzelach, jak również w wątrobie, śledzionie, węzłach chłonnych oraz mózgu. Wśród objawów narażenia wymienia się również zmiany w rogówce oka, podrażnienie błon śluzowych i spojówek, ale także spadek wydajności płuc, możliwość wstąpienia skurczu oskrzeli i nasilenia objawów astmy u osób chorych. Notowano także wpływ SO_2 na wzrost zachorowalności na zapalenie oskrzeli wśród dzieci. Standardy emisyjne w przypadku ditlenku siarki nie zostały określone, jednak ze względu na fakt, iż źródłem emisji SO_2 do powietrza jest spalanie paliw zawierających siarkę, ograniczenia związane z emisją ditlenku siarki do powietrza wynikają z konieczności spełnienia wymogów dotyczących maksymalnej zawartości siarki w paliwie w oparciu o rozporządzenie Ministra Energii z dnia 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2018 poz. 1890), o czym nieco szerzej mowa w rozdziale 11.8. Z kolei odpowiednie przepisy wspólnotowe i krajowe regulują dopuszczalne stężenia SO_2 w powietrzu atmosferycznym, zarówno ze względu na ochronę zdrowia ludzi, jak i ochronę roślin. Ze względu na stwierdzone

występowanie objawów chorobowych i spadek czynności oddychania również przy znacznie niższych stężeniach SO_2 w powietrzu, aniżeli te, które są dopuszczalne na mocy obowiązujących przepisów, WHO rekomenduje znacznie niższe stężenie ditlenku siarki w powietrzu. EPA wymienia SO_2 wśród podstawowych zanieczyszczeń powietrza świadczących o jego jakości. Jak wskazano w punkcie 5.3 powyżej, badanie wykazało stężenie ditlenku siarki na poziomie od 400 do 500 mg/Nm^{3}u (patrz rysunek 40).

- Zanieczyszczenia pyłowe (PM) – są to cząstki stałe (choć w przypadku pyłu zawieszonego mowa jest o mieszaninie aerozolowej, złożonej zarówno z cząstek stałych, jak i ciekłych), organiczne bądź nieorganiczne. Są to zanieczyszczenia pochodzenia naturalnego lub emitowane w wyniku działalności człowieka. Do emisji tych pierwszych przyczyniają się przede wszystkim pożary lasów, czy wybuchy wulkanów, te drugie zaś przedostają się do powietrza wskutek spalania różnego rodzaju paliw: węgla, biomasy, odpadów, oleju napędowego, itp. Proces spalania materii organicznej powoduje, że na powierzchni tych cząstek, złożonych przede wszystkim z sadzy, gromadzić się może szereg innych substancji chemicznych, wśród których wiele cechuje się udokumentowanym negatywnym wpływem na zdrowie (w szczególności metale ciężkie, czy wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne). Oddziaływanie tych zanieczyszczeń na zdrowie człowieka ma dwojaki charakter: związany z fizyczną wielkością cząstek oraz z ich składem chemicznym. Ze względu na skutki zdrowotne kluczowe są dwie frakcje wielkościowe tych zanieczyszczeń, które się obecnie wyróżnia i których dopuszczalne stężenia są regulowane na mocy obowiązujących przepisów: PM_{10} (cząstki o średnicy aerodynamicznej zastępczej nieprzekraczającej 10 μm) oraz $PM_{2,5}$ (cząstki o średnicy aerodynamicznej zastępczej nieprzekraczającej 2,5 μm). W bardziej szczegółowych ocenach wyróżnia się dodatkowo frakcje submikronowe (PM_1) i cząstki ultadrobne ($PM_{0,1}$). Cząstki o wielkości powyżej 10 μm nie stanowią w praktyce znacznego zagrożenia dla człowieka, jako że szybko opadają zgodnie z siłami grawitacji, a gdy dostaną się do układu oddechowego są dość sprawnie z niego usuwane. Cząstki większe od 8 μm pozostają w obrębie gardła, krtani i tchawicy, a te o średnicach pomiędzy 1 a 8 μm przedostają się do oskrzeli i pęcherzyków płucnych, gdzie mogą się zatrzymywać. Zanieczyszczenia pyłowe o wielkości ok. 0,5-3 μm są swobodnie deponowane w pęcherzykach płucnych, zaś mniejsze od 0,5 μm są z reguły usuwane wraz z wydechem. Na szkodliwość pyłów wpływa jednak nie tylko wielkość ich cząstek, ale również wspomniany wyżej skład chemiczny – na powierzchni ziaren pyłów sorpcji ulegają różnego rodzaju metale (w tym tzw. metale ciężkie) oraz szczególnie niebezpieczne dla zdrowia wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), z których wiele ma charakter kancerogenny. Same pyły zostały również uznane przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (w listopadzie 2013 roku) za czynnik o udowodnionym oddziaływaniu kancerogennym – są czynnikiem ryzyka w przypadku raka płuc i pęcherza moczowego. Powodują jednak szereg innych uciążliwości, jak choćby zaburzenia czynności płuc, podrażnienie dróg oddechowych, trudności w oddychaniu, czy kaszel. Pył zawieszony jest czynnikiem zwiększającym częstość zaostrzeń w przebiegu astmy oskrzelowej i przewlekłej obturacyjnej choroby płuc (POChP). Sprzyja również powstawaniu stanu zapalnego w układzie krążenia, powoduje zwiększone ryzyko miażdżycy, czy zawału mięśnia sercowego. Narażenie na podwyższone stężenia cząstek stałych powoduje zwiększenie liczby wizyt w szpitalnych oddziałach ratunkowych i zwiększenie hospitalizacji z powodu chorób układu oddechowego i chorób układu krążenia. Jest też związane ze zwiększeniem ogólnej umieralności oraz umieralności z powodu chorób układu oddechowego

i układu krążenia. W standardach emisyjnych określonych w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałeokreślone są dopuszczalne emisje pyłu, wyrażonego jako tzw. pył całkowity (TSP), a więc bez podziału na jego frakcje wielkościowe. Z kolei w obszarze jakości powietrza atmosferycznego, zarówno przepisy wspólnotowe, jak i tożsame z nimi przepisy krajowe regulują dopuszczalne stężenia w powietrzu cząstek PM_{10} i $PM_{2,5}$ ze względu na ochronę zdrowia ludzi. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (US EPA) uznaje cząstki stałe za jedno z sześciu zanieczyszczeń, których zawartość w powietrzu świadczy o jego jakości i które w zależności od długości wyeksponowania organizmu człowieka na ich oddziaływanie, mogą powodować wystąpienie różnorodnych niekorzystnych skutków zdrowotnych. Określone są również stężenia pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ rekomendowane przez WHO, jednak należy zaznaczyć, że Światowa Organizacja Zdrowia nie określa poziomu, poniżej którego można stwierdzić brak wpływu cząstek stałych na organizm człowieka.

- Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) – liczna grupa substancji, które obok innych rodzajów węglowodorów (alifatycznych, cyklicznych, czy aromatycznych) powstają wskutek procesów spalania zachodzących zarówno w źródłach stacjonarnych, jak i mobilnych. Ze względu na zdecydowanie wysoki potencjał kancerogenności, szczególną uwagę w przypadku procesów spalania należy zwrócić właśnie na WWA, będące grupą związków zbudowanych z dwóch lub więcej pierścieni aromatycznych (połączonych ze sobą liniowo lub w postaci rozgałęzionej), powstające przede wszystkim wskutek niecałkowitego i niezupełnego spalania materii organicznej w źródłach. Jeśli chodzi o źródła stacjonarne, to udział w emisji WWA odgrywają procesy spalania paliw stałych (węgla i drewna) w indywidualnych paleniskach domowych, przemysł koksowniczy, a w znacznie mniejszym stopniu produkcja aluminium, tworzyw sztucznych, czy środków ochrony roślin. W przypadku źródeł mobilnych są to głównie silniki pojazdów, jednak udział tych źródeł w ogólnym bilansie emisji jest relatywnie niewielki. WWA w niewielkim stopniu są emitowane do powietrza w fazie lotnej, a w większości ulegają adsorpcji na cząstkach pyłów, o czym była mowa wcześniej. Wiele z substancji z tej grupy należy do związków, w przypadku których potwierdzone jest silne oddziaływanie kancerogenne (należą do tzw. grupy 1 Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem). WWA ze względu na liczne źródła emisji obecne są w powietrzu atmosferycznym, glebie i wodzie w postaci bardzo różnorodnych związków, wnikających do organizmu drogą oddechową, poprzez układ pokarmowy, jak również przez skórę. Wśród osób niepalących droga pokarmowa jest uważana za najbardziej znaczące źródło ekspozycji na WWA (za wyjątkiem osób narażonych zawodowo na wpływ tego rodzaju substancji). Jeśli chodzi o właściwości biologiczne WWA do najlepiej rozpoznanych substancji należy 3-4 benzopiren, częściej oznaczany jako benzo(a)piren (BaP). W ocenie jakości powietrza stanowi on substancję wskaźnikową dla zanieczyszczenia powietrza wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi. WWA ze względu na lipofilowy charakter łatwo wnikają przez błony komórkowe, mając tendencję do gromadzenia się w nerkach i wątrobie, zaś w mniejszym stopniu w śledzionie, gruczołach nadnercza, czy jajnikach. Szereg badań wykazało, że związki z grupy WWA mają charakter immunotoksyczny, genotoksyczny, kancerogenny oraz teratogenny. Związki z tej grupy nie są oznaczane w spalinach emitowanych bezpośrednio ze źródeł, jednak ich stężenia w powietrzu atmosferycznym (a w zasadzie stężenia wskaźnikowego benzo(a)pirenu) są mocno limitowane, zarówno w oparciu o przepisy unijne,

jak i krajowe. Podobnie, jak w przypadku pyłów WHO nie określa poziomu, poniżej którego można stwierdzić brak wpływu WWA (w tym BaP) na organizm człowieka, jednak podaje tzw. poziom referencyjny, znacznie (8-krotnie) niższy w porównaniu do docelowego stężenia określonego w przepisach prawa krajowego i UE (które w przypadku Polski jest rozkrocznie wielokrotnie przekraczane w przeważającej liczbie stacji monitoringu jakości powietrza). Spełnienie poziomu referencyjnego jest związane z zapewnieniem odpowiednio niskiego ryzyka nowotworowego wśród osób wyeksponowanych na oddychanie powietrzem zanieczyszczonym benzo(a)pirenem (ale również szeregiem innych WWA). Dowiedzione szkodliwe oddziaływanie substancji z grupy WWA na organizm człowieka spowodowało, że zaliczono je do substancji niebezpiecznych, których emisja powinna być w zasadzie wyeliminowana (w najgorszym razie zmniejszona do absolutnego minimum). Warto zwrócić uwagę, że EPA (podobnie, jak WHO) koncentruje się na 16 WWA, które zostały wprowadzone na listę 126 priorytetowych zanieczyszczeń, ze względu na ich toksyczny charakter, potencjalnie niebezpieczny wpływ na ludzi oraz częstotliwość występowania w miejscach związanych z obecnością niebezpiecznych odpadów.

11.5. Analiza porównawcza emisji ze spalania przedmiotowego ekogroszku i innych paliw (jak np. gaz czy lekki olej opałowy) lub innych nowoczesnych technologii stosowanych w ogrzewnictwie

Ze względu na fakt, że badania, których wyniki zostały przedstawione w niniejszym opracowaniu były realizowane jedynie w odniesieniu do paliwa węglowego, analiza porównawcza z emisjami z innych źródeł ma charakter wskaźnikowy.

Należy stwierdzić, że korzystanie w celach grzewczych z paliw stałych, a zwłaszcza węgla, w gospodarstwach domowych cechuje się największym niekorzystnym oddziaływaniem na jakość powietrza. Problem ten należy rozpatrywać raczej w długim, aniżeli krótkim horyzoncie czasowym, kiedy to ujawniają się kluczowe różnice w emisjach. Na wielkość tej emisji wpływa bowiem szereg parametrów, związanych zarówno z warunkami pogodowymi (np. długość trwania sezonu grzewczego, rozkład zmienności temperatur powietrza zewnętrznego), warunkami technicznymi budynku (jak np. powierzchnia budynku i jego standard energetyczny, stosowanie urządzenia grzewczego do obsługi CO, czy również podgrzewania CWU), jak i z warunkami zapotrzebowania na energię (związanymi m.in. z liczbą osób zamieszkujących w budynku, zapotrzebowaniem wody na osobę, czy liczbą dni w roku, w które występuje to zapotrzebowanie).

Przedstawione poniżej obliczenia zrealizowano w oparciu o kalkulator emisji zanieczyszczeń firmy Vaillant (https://vaillant-partner.pl/kalkulatory-on-line/kalkulator-emisji-zanieczyszczen/), przyjmując określone założenia, jak: standard energetyczny budynku (zużycie energii na poziomie 90 kWh/m^2·a), ogrzewaną powierzchnię (120 m^2), czy liczbę mieszkańców (4 osoby) i wynikające z tego zapotrzebowanie na ciepło i CWU (zapotrzebowanie na wodę: 60 dm^3/os·d; temperatura wody ciepłej: 45°C). Przyjmując zatem te założenia i porównując spalanie ekogroszku w dedykowanym do tego celu kotle węglowym, można stwierdzić:

- W przypadku zastosowania kotłów gazowych na gaz ziemny i gaz LPG:
    - Nie będą w zasadzie występować emisje pyłów, zwłaszcza w przypadku kotłów kondensacyjnych. Minimalne ilości (rzędu ułamków kilograma) mogą się pojawiać w przypadku stałotemperaturowych kotłów na gaz ziemny;

- Emisje CO będą ok. 2 rzędów wielkości mniejsze, przy czym w odniesieniu do kotłów kondensacyjnych mogą one być 200-krotnie niższe, zaś w przypadku stałotemperaturowych kotłów na gaz ziemny będą i tak co najmniej 100-krotnie niższe;
- Emisje NO_x będą 3-5-krotnie niższe, z wyższymi różnicami w odniesieniu do kotłów kondensacyjnych;
- Emisje SO_2 będą co najmniej 2-3 rzędy wielkości mniejsze, przy czym w przypadku kotłów kondensacyjnych należy spodziewać się ok. 1000-krotnych różnic, zaś w przypadku stałotemperaturowych kotłów na gaz ziemny różnice te będą na poziomie 500-700-krotności;

- W przypadku kotłów zasilanych olejem opałowym:
  - Emisje pyłów będą minimalne, a różnice w tych emisjach będą sięgać 100-krotności w przypadku kotłów kondensacyjnych, zaś w przypadku kotłów niskotemperaturowych będą nieco mniejsze, choć i tak różnice będą na poziomie 70-80-krotności;
  - Emisje CO będą, podobnie jak w przypadku kotłów gazowych, ok. 2 rzędów wielkości mniejsze i będą nawet 150-krotnie niższe w przypadku kotłów kondensacyjnych i ok. 100-krotnie niższe w przypadku kotłów niskotemperaturowych;
  - Emisje NO_x będą ok. 2-krotnie niższe;
  - Emisje SO_2 będą ok. 5-6 krotnie niższe (nieco większe w przypadku kotłów kondensacyjnych, nieco mniejsze w przypadku kotłów niskotemperaturowych);
- W przypadku kotłów opalanych drewnem:
  - Emisje pyłów będą ok. 30-35-krotnie niższe, przy czym w przypadku kotłów zgazowujących drewno emisje te będą ok. 30-krotnie niższe, zaś w przypadku kotłów zasilanych pelletem ok. 35-krotnie niższe;
  - Emisje CO będą nieznacznie się różnić w odniesieniu do kotłów zgazowujących drewno, zaś ok. 10-krotnie niższych emisji należy oczekiwać w przypadku kotłów na pellet drzewny;
  - Emisje NO_x będą ok. 2-krotnie niższe;
  - Emisje SO_2 będą niższe (ok. 10-krotnie) w przypadku kotłów zgazowujących drewno, zaś w przypadku kotłów zasilanych pelletem mogą być zauważalnie (2-2,5-krotnie) wyższe.

Przedstawione wyniki porównania pomiędzy emisją zanieczyszczeń z różnych źródeł pochodzą z obliczeń przeprowadzonych przy określonych założeniach, w tym założeniach dotyczących średniorocznej sprawności różnych urządzeń grzewczych: dla kotła na ekogroszek 75%/50% (tryb pracy na ogrzewanie/tryb pracy na CWU), dla kotłów zasilanych gazem ziemnym 70%/60% w przypadku kotła stałotemperaturowego i 109%/100% w przypadku kotła kondensacyjnego, dla kotła kondensacyjnego zasilanego gazem płynnym 107%/98%, dla kotłów zasilanych olejem opałowym 88%/70% w przypadku kotła niskotemperaturowego i 105%/95% w przypadku kotła kondensacyjnego, dla kotła opalanego pelletem 88%/70%.

11.6. Porównanie emisji CO_2 ze spalania przedmiotowego ekogroszku oraz innych frakcji węgla kamiennego i pozostałych wybranych paliw (jak np. gaz czy lekki olej opałowy) stosowanych w ogrzewnictwie

Podobną analizę wskaźnikową (w oparciu o ten sam kalkulator emisyjny), jak to przedstawiono w rozdziale 11.5 można zaproponować w odniesieniu do przedstawienia różnic w emisji ditlenku węgla. Należy mieć na uwadze, że każde źródło związane ze spalaniem paliw kopalnych stałych, płynnych, czy gazowych jest związane z emisją CO_2, będącym nieodzownym produktem wszystkich procesów, w których zachodzi spalanie materii organicznej.

Różnice w wielkości emisji pomiędzy kotłem spalającym ekogroszek a pozostałymi rodzajami palenisk nie są w tym przypadku tak spektakularne, jak w przypadku typowych zanieczyszczeń atmosferycznych. W odniesieniu do emisji CO_2 podczas spalania ekogroszku różnice będą się kształtowały na następujących poziomach:

- W przypadku zastosowania kotłów gazowych na gaz ziemny i gaz LPG będą ok. 2,5-krotnie niższe w odniesieniu do kotłów kondensacyjnych i ok. 1,5-2-krotnie niższe w odniesieniu do stałotemperaturowych kotłów na gaz ziemny;
- W przypadku kotłów zasilanych olejem opałowym będą ok. 1,5-2,5-krotnie niższe, z większymi różnicami w odniesieniu do kotłów kondensacyjnych;
- W przypadku kotłów opalanych drewnem różnice będą większe i sięgną kilkukrotności (ok. 5-7-krotnie niższe) w przypadku kotłów na pellet do nawet 20-krotnie niższe w odniesieniu do kotłów zgazowujących drewno.

Należy mieć na uwadze, że porównania tego dokonano przy określonych założeniach, o których mowa w rozdziale 11.5, przy czym założenia te dotyczą uśrednionej rocznej emisji, określającej masę zanieczyszczenia wyemitowaną w jednostce czasu (w tym przypadku w ciągu roku). Informacje dotyczące wskaźników emisji CO_2 znaleźć można również w raportach Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE), przy czym tam odniesione są one do masy CO_2 w stosunku do jednostki energii uzyskiwanej ze spalania danego paliwa (wyrażonej np. w GJ). Z opracowania „Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO2 (WE) w roku 2016 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2019" wynika, że różnice w emisji CO_2 ze spalania węgla kamiennego (a takim jest również ekogroszek) w odniesieniu do innych paliw są następujące:

- Emisja CO_2 ze spalania gazu ziemnego jest ok. 1,7-krotnie niższa;
- Emisja CO_2 ze spalania oleju opałowego jest ok. 1,2-krotnie niższa;
- Emisja CO_2 ze spalania drewna opałowego jest ok. 1,2-krotnie wyższa.

Niestety brakuje podobnych wskaźników odnoszących się do zanieczyszczeń, o których mowa była w rozdziale 11.5. Różnice występujące w przypadku obu sposobów obliczeń mogą częściowo wynikać z dość niskiej sprawności, jaka została przyjęta w kalkulatorze emisyjnym firmy Vaillant, w odniesieniu do stałotemperaturowych kotłów gazowych, czy kotłów olejowych. Rzeczywiste parametry kotłów wskazują na wyższe sprawności, stąd też w praktyce różnice w emisjach mogą być nieco mniejsze i być bliższe temu, co znajduje się w raporcie KOBiZE. Nie da się tym jednak wyjaśnić różnic w emisji CO_2 ze spalania drewna opałowego. Kilku- czy kilkudziesięciokrotne różnice w emisji mogą wynikać wyłącznie z przyjęcia bardzo specyficznych założeń odnośnie emisji CO_2 pochodzącej ze spalania drewna, w szczególności założenia, że drewno odpowiada za emisję dwutlenku węgla, który

został wcześniej pochłonięty przez drzewo, z którego to drewno powstało. Należy jednak podkreślić, że są to jedynie dywagacje, ponieważ w opisie założeń przyjętych do obliczeń takiej informacji nie ma. Ponieważ emisja CO_2 ze spalania drewna powinna być zbliżona do emisji pochodzącej ze spalania węgla kamiennego, należy przyjąć, że bliższe rzeczywistości są wskaźniki pochodzące z raportu KOBiZE.

11.7. Opis stężenia pyłów wewnątrz pomieszczenia, gdzie spalany był przedmiotowy ekogroszek

W oparciu o wyniki pomiarów prowadzonych wewnątrz pomieszczenia, w którym zlokalizowany był kocioł spalający analizowany ekogroszek, co zostało szerzej przedstawione w rozdziale 7, można stwierdzić, że stężenia pyłu $PM_{2,5}$ panujące we wnętrzu kotłowni są wyraźnie wyższe, aniżeli stężenia pyłu $PM_{2,5}$, które w tym samym czasie panowały na zewnątrz pomieszczenia. Zaobserwowano znaczne różnice w stężeniach pyłu $PM_{2,5}$ zarówno w powietrzu zewnętrznym, jak i wewnętrznym w trakcie realizacji pomiarów podczas trwania serii 1 i 2 w jednym dniu pomiarowym oraz serii 3 i 4 w innym dniu.

Jakość powietrza wewnętrznego jest z reguły kształtowana przez 2 rodzaje czynników. Pierwszym z nich jest jakość powietrza atmosferycznego. Powietrze zewnętrzne migruje do wnętrz pomieszczeń przez systemy wentylacyjne oraz nieszczelności w przegrodach takich jak drzwi i okna (lub przez systemy mikrowentylacji w oknach). Z reguły wpływ tej grupy czynników jest znaczny, z wyjątkiem budynków, w których występują zaawansowane systemy wentylacyjne, z recyrkulacją i oczyszczaniem powietrza docierającego z zewnątrz do wnętrz pomieszczeń. W analizowanej sytuacji nie występował jednak taki przypadek. Drugą grupą czynników są wewnętrzne źródła emisji, do których w szczególności należą różnego rodzaju paleniska (kotły, kominki, kozy, itp.), czy też np. osoby palące wyroby tytoniowe. W przypadku przedmiotowej sytuacji, jedynym wewnętrznym źródłem emisji był kocioł węglowy, będący głównym elementem stanowiska badawczego.

Mając powyższe na uwadze, można stwierdzić, że najpewniej w omawianej sytuacji jakość powietrza wewnętrznego została ukształtowana przez obie grupy czynników. W trakcie trwania serii 1 i 2, gdy jakość powietrza zewnętrznego była relatywnie dobra, w znikomym stopniu wpłynęła ona na stężenia pyłu $PM_{2,5}$ we wnętrzu kotłowni. Z kolei w trakcie trwania pomiarów serii 3 i 4, dość wysokie stężenia pyłu $PM_{2,5}$ w powietrzu atmosferycznym mogły częściowo przyczynić się do podwyższenia stężeń we wnętrzu pomieszczenia (stanowiąc wyższe tło wyjściowe dla jakości powietrza wewnętrznego), niemniej jednak stężenia pyłu $PM_{2,5}$ wewnątrz kotłowni kształtowały się na znacznie wyższych poziomach, na co najpewniej miał wpływ proces spalania w kotle badanego węgla.

11.8. Ocena zasadności nazywania badanego paliwa ekologicznym

Jak już wspomniano w rozdziale 11.3 nazwa handlowa „ekogroszek" ma świadczyć w zamyśle producentów o lepszych własnościach węgla w stosunku do sortymentu „groszek" niepoprzedzonego w nazwie przedrostkiem „eko". Dokładnie w taki sposób kwestia nazewnictwa funkcjonuje również w przypadku producenta węgla będącego przedmiotem analiz opisanych w niniejszym opracowaniu. Producent węgla marki [XXX] (stanowiącego główne paliwo wykorzystywane w czasie badań) na swojej witrynie internetowej (www. [XXX].pl) opisuje „ekogroszek" w następujący sposób: *[xxx]*

Zatem z punktu widzenia nabywców ekogroszku marki [XXX] klarowne jest, że zakupują paliwo ekologiczne, cechujące się lepszymi parametrami w stosunku do innych tradycyjnych sortymentów węgla, w szczególności w stosunku do węgla sortymentu „groszek". W świetle badań i analiz, których wyniki zostały przedstawione we wcześniejszej części niniejszego opracowania, wydaje się, że w

przypadku przedmiotowego produktu stosowanie nazewnictwa sugerującego jego ekologiczność (rozumianą, jako przyjazność dla środowiska, w szczególności jakości powietrza) nie jest uzasadnione. Przesłanki wskazujące na brak takiej zasadności pojawiają się jeszcze przed przystąpieniem do właściwego badania, polegającego na analizach związanych z procesem spalania paliwa, a więc na etapie analizy składu samego paliwa.

Według deklaracji producenta ekogroszek marki [XXX] powinien spełniać parametry, które wskazano w rozdziale 11.3. Analiza, której wyniki zaprezentowano w rozdziale 4.1 i załączniku 1 wskazuje, że kluczowe odstępstwo w stosunku do deklaracji producenta dotyczy zawartości popiołu. Oznaczona wartość tego parametru wynosząca niemal 15% okazała się ponad dwukrotnie wyższa od deklarowanej. Następstwem tej sytuacji jest również zauważalnie niższa wartość opałowa paliwa, wynosząca nieco ponad 24 MJ/kg i będąca o niemal 2 MJ/kg mniejszą od dolnej wartości przedziału deklarowanego przez producenta. Co więcej jest jedynie na granicy minimalnego (24,00 MJ/kg) wymogu wspomnianego wyżej rozporządzenia Ministra Energii. Skutkiem wysokiej zawartości popiołu może być zarówno wysoka emisja pyłu, jak również znaczna zawartość części palnych w ubocznych produktach spalania (żużlu), które to zjawiska zaobserwowano podczas badań. Należy tu również dodać, że zawartość siarki, innego kluczowego parametru podstawowego, jest na poziomie maksymalnym deklarowanym przez producenta, przy czym stwierdzona wartość znajduje w granicach dopuszczalności wspomnianego rozporządzenia (1,20%). W dopuszczalnych rozporządzeniem granicach (do 15,00%), będących jednocześnie deklarowanymi przez producenta, mieści się również zawartość wilgoci całkowitej. Zawartość wilgoci okazała się być ponad trzykrotnie niższa (4,8%) od dopuszczalnej.

Podsumowując stwierdzono znaczne przekroczenie nie tylko deklarowanej przez producenta zawartości popiołu, ale również wyraźnie niższą od deklarowanej wartość opałową paliwa.

Dodatkowego uzasadnienia dostarcza tu również wynik badania składu spalin, zarówno w zakresie dopuszczalnych stężeń substancji gazowych, jak również pyłów w strumieniu emisyjnym. Mając na uwadze, że w procesie badawczym zastosowano kocioł spełniający wymogi Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiającej ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią, do którego dedykowanym paliwem jest paliwo typu ekogroszek, zaś użyty podczas badania węgiel przeznaczony jest zgodnie z deklaracją producenta do niskoemisyjnych palenisk, oczekiwać należało, że parametry emisyjne będą spełniać wymogi określone dla kotłów klasy 5 z załadunkiem automatycznym o mocy mniejszej bądź równej 50 kW. Wyniki badania wykazały jednak, że w trakcie żadnej z 4 serii pomiarowych (dla paliwa [XXX]) nie udało się osiągnąć mieszczącej się w granicach określonych regulacjami Rozporządzenia Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe, emisji tlenku węgla, tlenków azotu oraz pyłu całkowitego. W przypadku tlenku węgla najniższa średnia emisja wynosiła 270% wartości określonej w standardach, zaś najwyższa niemal 650%. Nieznacznie lepsza była sytuacja w przypadku emisji NO_x, gdzie najniższa uśredniona emisja stanowiła nieco ponad 120% wartości określonej w standardach, zaś najwyższa ponad 180%. W przypadku emisji pyłów standardy wynikające z Rozporządzenia były znacząco przekroczone i wahały się od niemal 190% do ponad 8100%.

W przypadku drugiego z analizowanych paliw, tj. ekogroszku marki [YYY], wyniki przeprowadzonych badań i analiz emisji wskazują, że w tym przypadku również w żadnej z serii

pomiarowych nie dotrzymano standardów emisyjnych. W przypadku tego paliwa emisja tlenku węgla wynosiła od nieco ponad 400% do ponad 520% dla wartości określonej w standardach. W przypadku tlenków azotu odstępstwa od standardów wynosiły od niemal 140% do ponad 180% w stosunku do dopuszczalnych emisji, zaś w przypadku pyłów od ponad 540% do niemal 3500%.

W przypadku obu paliw w spalinach stwierdzono znaczne niekiedy stężenia niektórych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, a w szczególności te, które cechują się wysoką aktywnością biologiczną i należą do grupy substancji o wysokich potencjałach toksyczności, mutagenności i kancerogenności (w szczególności benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)piren, dibenzo(ah)antracen, indeno(123-cd)piren, benzo(ghi)perylen). Ze względu na szkodliwość tych związków dla zdrowia człowieka należy dążyć do całkowitej eliminacji źródeł, które stanowią przyczynę emisji tych zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego.

Wziąwszy pod uwagę powyższe, jak również dodatkowo fakt, iż w pozostałościach stałych po procesie spalania znajdowały się znaczne ilości niedopalonego paliwa (od niemal 40% w przypadku ekogroszku marki [YYY]i od ponad 40% do niemal 70% w przypadku ekogroszku marki [XXX]), co wskazuje na występowanie zjawiska niecałkowitego spalania (o czym świadczy również obliczona w wyniku badania sprawność), można jednoznacznie ocenić, że przedmiotowe paliwo nie jest paliwem przyjaznym dla środowiska. Zdecydowanie nie jest ono również przyjazne dla społeczeństwa, ze względu na znaczące emisje do powietrza zanieczyszczeń stanowiących poważne zagrożenie dla zdrowia ludności. Reasumując zatem przedmiotowe paliwo – ekogroszek marki [XXX] – nie może być uznany za paliwo ekologiczne.

12. Załącznik 1

Poniżej przedstawiono sprawozdanie z badań (nr LBAP/58/2020), dotyczące wybranych parametrów analizowanego paliwa marki [XXX].

INSTYTUT ENERGETYKI
01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8
Laboratorium Badawcze Analizy Paliw
02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36
tel: 797 905 456 / 797 905 104
http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/58/2020	
Data wydania: 18.12.2020 r.	**strona:** 1 / 2
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020
Nr ewidencyjny próbki:	31/2020/1
Oznakowanie próbki wg zleceniodawcy:	próbka Węgiel 1
Opis próbki wg LBAP:	próbka węgla kamiennego
Ocena stanu próbki:	Pozytywny (pudełko z tworzywa sztucznego, próbka w stanie analitycznym)
Masa dostarczonej próbki:	1,2 kg (sprawdzone w LBAP)
Data przyjęcia próbki:	14.12.2020 r.
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.
Data zakończenia badań:	18.12.2020 r.
Kryteria oceny do stwierdzenia zgodności zgodnie z ustaleniami ze zleceniodawcą:	nie dotyczy
Zasada podejmowania decyzji ustalona ze zleceniodawcą:	nie dotyczy
Informacje zleceniodawcy dot. poboru próbki:	Próbka pobrana metodą własną.
Inne istotne informacje ustalone ze zleceniodawcą na etapie ofertowym:	Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha		Nr normy/procedury	Status*
wilgoć całkowita	W_t^r	PN-80/G-04511 met. wagowa**	A
wilgoć analityczna	W^a	PN-80/G-04511 met. wagowa**	A
popiół	A^a	PN-ISO 1171:2002 met. wagowa	A
części lotne	V^a	PN-G-04516:1998 met. wagowa	B
ciepło spalania	Q_s^a	PN-G-04513:1981 met. Kalorymetryczna	B
wartość opałowa	Q_i^a	PN-G-04513:1981 z obliczeń	B
węgiel	C_t^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	A
wodór	H_t^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	A
azot	N^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	B
siarka całkowita	S_t^a	PN-G-04584:2001 met. wysokotemperaturowego spalania	A

* A - oznaczenie objęte zakresem akredytacji
B - oznaczenie nieobjęte zakresem akredytacji
Wybór oznaczenia jest jednocześnie wyborem badanej cechy.
** Norma wycofana bez zastąpienia przez PKN

KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Paweł Świątkowski

Zatwierdził:

Analiza - nr ewidencyjny próbki:31/2020/1			**STAN**							
			roboczy		**analityczny**		**suchy**		**suchy i bezpopiołowy**	
			r	**U*****	**a**	**U*****	**d**	**U*****	**daf**	**U*****
wilgoć całkowita	W_t	%	4,8	0,6	-	-	-	-	-	-
wilgoć analityczna	W	%	-	-	2,3	0,5	-	-	-	-
popiół	A	%	14,8	0,4	15,2	0,4	15,6	0,4	-	-
części lotne	V	%	32,55	1,36	33,41	1,38	34,19	1,42	40,49	1,69
ciepło spalania	Q_s	kJ/kg	25334	273	25998	206	26608	240	31509	250
wartość opałowa	Q_i	kJ/kg	24304	484	25005	231	25649	261	30373	348
węgiel	C_t	%	63,5	4,6	65,1	4,7	66,7	4,8	78,9	5,7
wodór	H_t	%	4,18	0,47	4,29	0,48	4,39	0,49	5,20	0,58
azot	N	%	1,71	0,28	1,75	0,29	1,79	0,30	2,13	0,35
siarka całkowita	S_t	%	0,62	0,11	0,64	0,12	0,65	0,12	0,77	0,14

*** Niepewność pomiaru *U* podajemy jako niepewność rozszerzoną dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ i prawdopodobieństwo rozszerzenia około 95 %. Niepewność pomiaru *U* nie uwzględnia składowej dotyczącej etapu pobierania próbek.

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie otrzymanej próbki, próbka została pobrana i dostarczona przez Zleceniodawcę.
Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).
Wyniki dla ciepła spalania i wartości opałowej, pomimo tego że znajdują się w zakresie akredytacji, mają status B (oznaczenie nieobjęte zakresem akredytacji), ponieważ poprawka na azot uwzględniana do wyznaczenia ciepła spalania ma status B.

Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

KONIEC

13. Załącznik 2

Poniżej przedstawiono sprawozdanie z badań (nr LBAP/59/2020), dotyczące wybranych parametrów analizowanego paliwa marki [YYY].

INSTYTUT ENERGETYKI
01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8
Laboratorium Badawcze Analizy Paliw
02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36
tel: 797 905 456 / 797 905 104
http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/59/2020	
Data wydania: 18.12.2020 r.	**strona:** 1 / 2
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020
Nr ewidencyjny próbki:	31/2020/2
Oznakowanie próbki wg zleceniodawcy:	próbka Węgiel 2
Opis próbki wg LBAP:	próbka węgla kamiennego
Ocena stanu próbki:	Pozytywny (pudełko z tworzywa sztucznego, próbka w stanie analitycznym)
Masa dostarczonej próbki:	1,0 kg (sprawdzone w LBAP)
Data przyjęcia próbki:	14.12.2020 r.
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.
Data zakończenia badań:	18.12.2020 r.
Kryteria oceny do stwierdzenia zgodności zgodnie z ustaleniami ze zleceniodawcą:	nie dotyczy
Zasada podejmowania decyzji ustalona ze zleceniodawcą:	nie dotyczy
Informacje zleceniodawcy dot. poboru próbki:	Próbka pobrana metodą własną.
Inne istotne informacje ustalone ze zleceniodawcą na etapie ofertowym:	Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha		**Nr normy/procedury**	**Status***
wilgoć całkowita	W_t^r	PN-80/G-04511 met. wagowa**	A
wilgoć analityczna	W^a	PN-80/G-04511 met. wagowa**	A
popiół	A^a	PN-ISO 1171:2002 met. wagowa	A
części lotne	V^a	PN-G-04516:1998 met. wagowa	B
ciepło spalania	Q_s^a	PN-G-04513:1981 met. Kalorymetryczna	B
wartość opałowa	Q_i^a	PN-G-04513:1981 z obliczeń	B
węgiel	C_t^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	A
wodór	H_t^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	A
azot	N^a	PN-G-04571:1998 met. wysokotemperaturowego spalania	B
siarka całkowita	S_t^a	PN-G-04584:2001 met. wysokotemperaturowego spalania	B

* A - oznaczenie objęte zakresem akredytacji
B - oznaczenie nieobjęte zakresem akredytacji
Wybór oznaczenia jest jednocześnie wyborem badanej cechy.
** Norma wycofana bez zastąpienia przez PKN

KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

Zatwierdził:

Analiza - nr ewidencyjny próbki:31/2020/2			**STAN**							
			roboczy		**analityczny**		**suchy**		**suchy i bezpopiołowy**	
			r	**U*****	**a**	**U*****	**d**	**U*****	**daf**	**U*****
wilgoć całkowita	W_t	%	10,3	0,8	-	-	-	-	-	-
wilgoć analityczna	W	%	-	-	4,1	0,5	-	-	-	-
popiół	A	%	5,8	0,3	6,2	0,3	6,4	0,3	-	-
części lotne	V	%	33,67	1,31	35,98	1,36	37,53	1,43	40,12	1,53
ciepło spalania	Q_s	kJ/kg	26421	322	28231	213	29451	258	31481	237
wartość opałowa	Q_i	kJ/kg	25218	510	27113	240	28390	280	30346	316
węgiel	C_t	%	66,9	4,8	71,5	5,1	74,6	5,3	79,7	5,7
wodór	H_t	%	4,36	0,48	4,66	0,51	4,86	0,53	5,20	0,57
azot	N	%	1,84	0,29	1,97	0,31	2,05	0,32	2,19	0,34
siarka całkowita	S_t	%	0,21	0,06	0,22	0,06	0,23	0,07	0,25	0,07

*** Niepewność pomiaru *U* podajemy jako niepewność rozszerzoną dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ i prawdopodobieństwo rozszerzenia około 95 %. Niepewność pomiaru *U* nie uwzględnia składowej dotyczącej etapu pobierania próbek.

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie otrzymanej próbki, próbka została pobrana i dostarczona przez Zleceniodawcę.
Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).
Wyniki dla ciepła spalania i wartości opałowej, pomimo tego że znajdują się w zakresie akredytacji, mają status B (oznaczenie nieobjęte zakresem akredytacji), ponieważ poprawki na azot i siarkę całkowitą uwzględniane do wyznaczenia ciepła spalania mają status B.

Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

KONIEC

14. Załącznik 3

Poniżej przedstawiono sprawozdania z badań (nr LBAP/60/2020, LBAP/61/2020, LBAP/62/2020 oraz LBAP/63/2020, odpowiednio dla serii 1, 2 3 i 4), dotyczące zawartości części palnych w żużlu pobranym po spaleniu analizowanego paliwa marki [XXX].

INSTYTUT ENERGETYKI
01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8
Laboratorium Badawcze Analizy Paliw
02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36
tel: 797 905 456 / 797 905 104
http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/60/2020		
Data wydania: 18.12.2020 r.		**strona:** 1 / 1
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa	
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020	
Nr ewidencyjne próbek:	31/2020/3	
Opis próbek:	Próbka żużla	
Data przyjęcia próbek:	14.12.2020 r.	
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.	
Data zakończenia badań:	17.12.2020 r.	

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha	**Nr normy**
Straty prażenia	PN-77 G-04528/02 metoda wagowa

Nr ewidencyjny próbki:	**Nazwa próbki**	**Wynik, stan analityczny, %**
31/2020/3	Próbka Żużel 1	**51,45**

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie badanej próbki, próbka została pobrana przez Zleceniodawcę. Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

KONIEC

INSTYTUT ENERGETYKI

01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8

Laboratorium Badawcze Analizy Paliw

02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36

tel: 797 905 456 / 797 905 104

http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/61/2020		
Data wydania: 18.12.2020 r.		**strona:** 1 / 1
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa	
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020	
Nr ewidencyjne próbek:	31/2020/4	
Opis próbek:	Próbka żużla	
Data przyjęcia próbek:	14.12.2020 r.	
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.	
Data zakończenia badań:	17.12.2020 r.	

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha	Nr normy
Straty prażenia	PN-77 G-04528/02 metoda wagowa

Nr ewidencyjny próbki:	Nazwa próbki	Wynik, stan analityczny, %
31/2020/4	Próbka Żużel 2	**54,78**

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie badanej próbki, próbka została pobrana przez Zleceniodawcę. Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

KONIEC

INSTYTUT ENERGETYKI

01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8

Laboratorium Badawcze Analizy Paliw

02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36

tel: 797 905 456 / 797 905 104

http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/62/2020	
Data wydania: 18.12.2020 r.	**strona:** 1 / 1
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020
Nr ewidencyjne próbek:	31/2020/5
Opis próbek:	Próbka żużla
Data przyjęcia próbek:	14.12.2020 r.
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.
Data zakończenia badań:	17.12.2020 r.

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha	Nr normy
Straty prażenia	PN-77 G-04528/02 metoda wagowa

Nr ewidencyjny próbki:	Nazwa próbki	Wynik, stan analityczny, %
31/2020/5	Próbka Żużel 3	**67,26**

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie badanej próbki, próbka została pobrana przez Zleceniodawcę. Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

Autoryzował:

KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw

mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:

KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH

dr inż. Bogdan Świątkowski

KONIEC

INSTYTUT ENERGETYKI

01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8

Laboratorium Badawcze Analizy Paliw

02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36

tel: 797 905 456 / 797 905 104

http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/63/2020	
Data wydania: 18.12.2020 r.	**strona:** 1 / 1
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020
Nr ewidencyjne próbek:	31/2020/6
Opis próbek:	Próbka żużla
Data przyjęcia próbek:	14.12.2020 r.
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.
Data zakończenia badań:	17.12.2020 r.

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha	Nr normy
Straty prażenia	PN-77 G-04528/02 metoda wagowa

Nr ewidencyjny próbki:	Nazwa próbki	Wynik, stan analityczny, %
31/2020/6	Próbka Żużel 4	**40,83**

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie badanej próbki, próbka została pobrana przez Zleceniodawcę. Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Dariusz Świątkowski

KONIEC

15. Załącznik 4

Poniżej przedstawiono sprawozdanie z badań (nr LBAP/64/2020), dotyczące zawartości części palnych w żużlu pobranym ze zmieszanych próbek po spaleniu analizowanego paliwa marki [YYY].

INSTYTUT ENERGETYKI
01 - 330 Warszawa, ul. Mory 8
Laboratorium Badawcze Analizy Paliw
02 - 981 Warszawa, ul. Augustówka 36
tel: 797 905 456 / 797 905 104
http://www.ien.com.pl e-mail: lbap@ien.com.pl

Sprawozdanie z badań nr LBAP/64/2020	
Data wydania: 18.12.2020 r.	**strona:** 1 / 1
Zleceniodawca:	Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. ul. St. Noakowskiego 18/20 00-668 Warszawa
Nr zlecenia:	LBAP/31/2020
Nr ewidencyjne próbek:	31/2020/7
Opis próbek:	Próbka żużla
Data przyjęcia próbek:	14.12.2020 r.
Data rozpoczęcia badań:	15.12.2020 r.
Data zakończenia badań:	17.12.2020 r.

W Laboratorium Badawczym Analizy Paliw Instytutu Energetyki wykonano analizy wg poniżej przedstawionych metod:

Badana cecha	Nr normy
Straty prażenia	PN-77 G-04528/02 metoda wagowa

Nr ewidencyjny próbki:	Nazwa próbki	Wynik, stan analityczny, %
31/2020/7	Próbka Żużel 5	**39,00**

Wyniki analiz dotyczą wyłącznie badanej próbki, próbka została pobrana przez Zleceniodawcę. Bez pisemnej zgody Laboratorium Badawczego Analizy Paliw sprawozdanie nie może być powielane inaczej jak tylko w całości.

Uwagi:

Wyniki badań będą wykorzystywane w celach badawczych (badanie kotła).

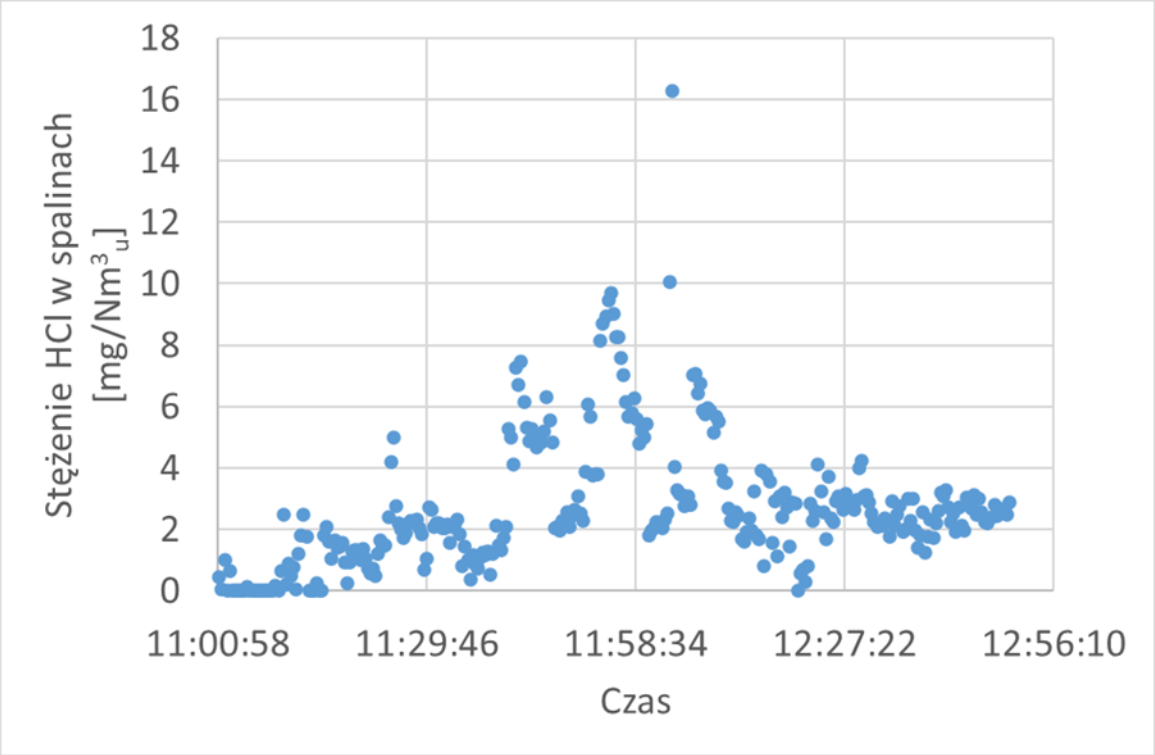
Autoryzował:
KIEROWNIK
Laboratorium Badawczego Analizy Paliw
mgr inż. Beata Murlikowska

Zatwierdził:
KIEROWNIK
ZAKŁADU PROCESÓW CIEPLNYCH
dr inż. Bartosz Świątkowski

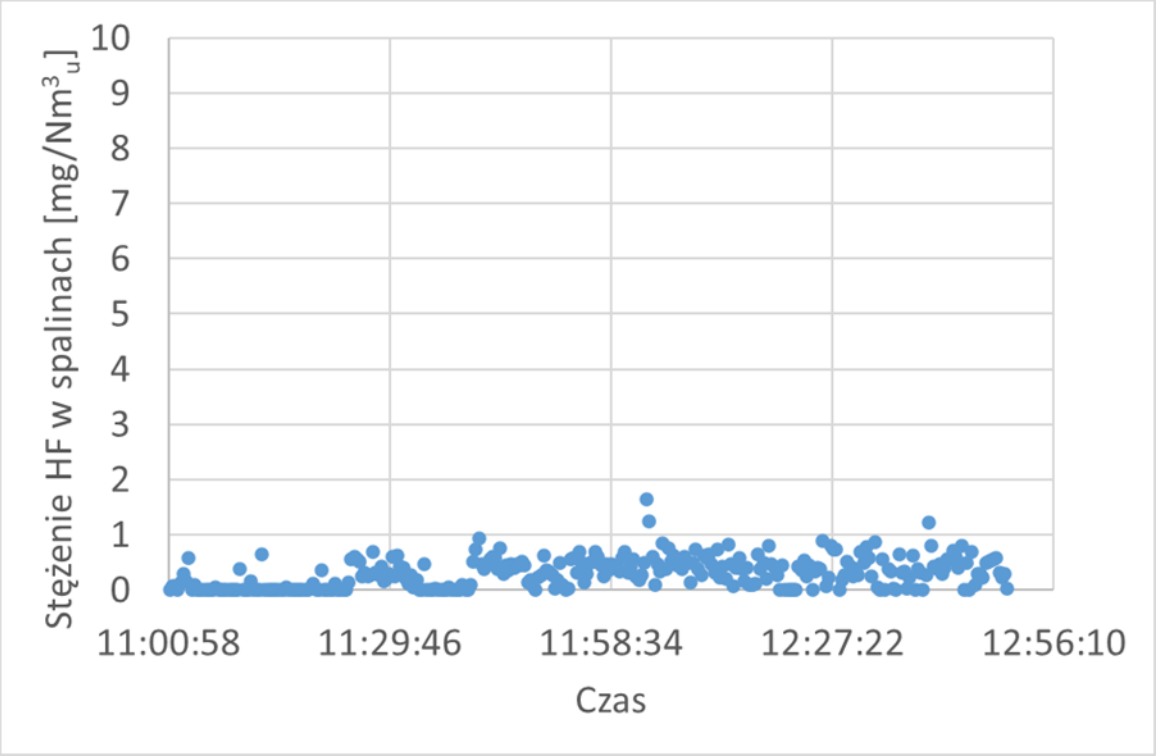
KONIEC

16. Załącznik 5

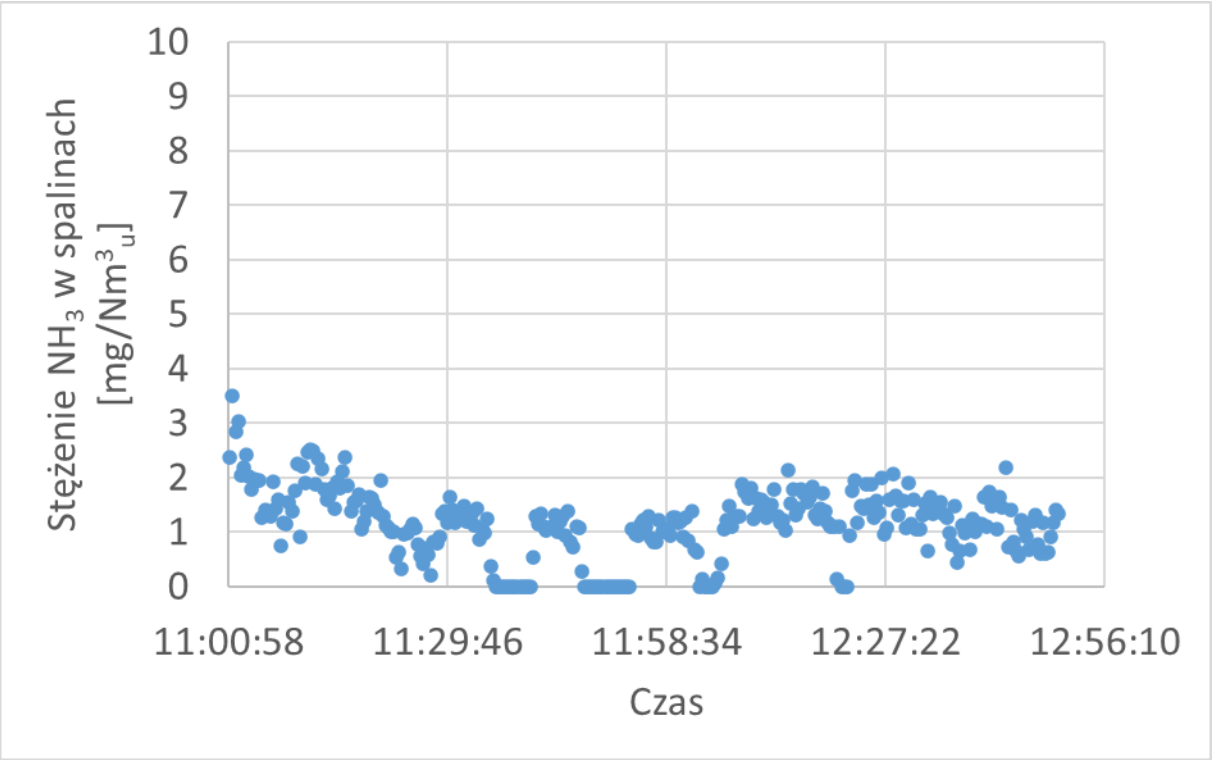
Poniżej zamieszczono wykresy przebiegu wartości mierzonych parametrów emisyjnych dla HCl, HF i NH_3.



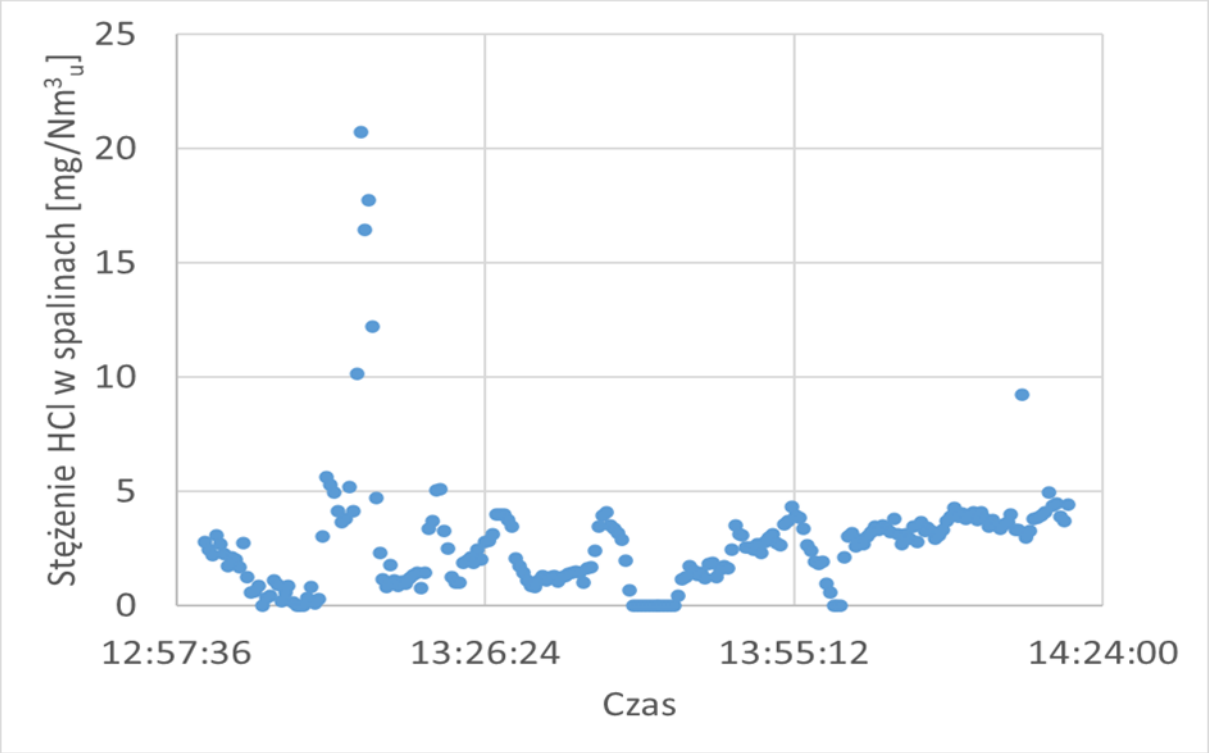
Rysunek 50 Stężenie HCl w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



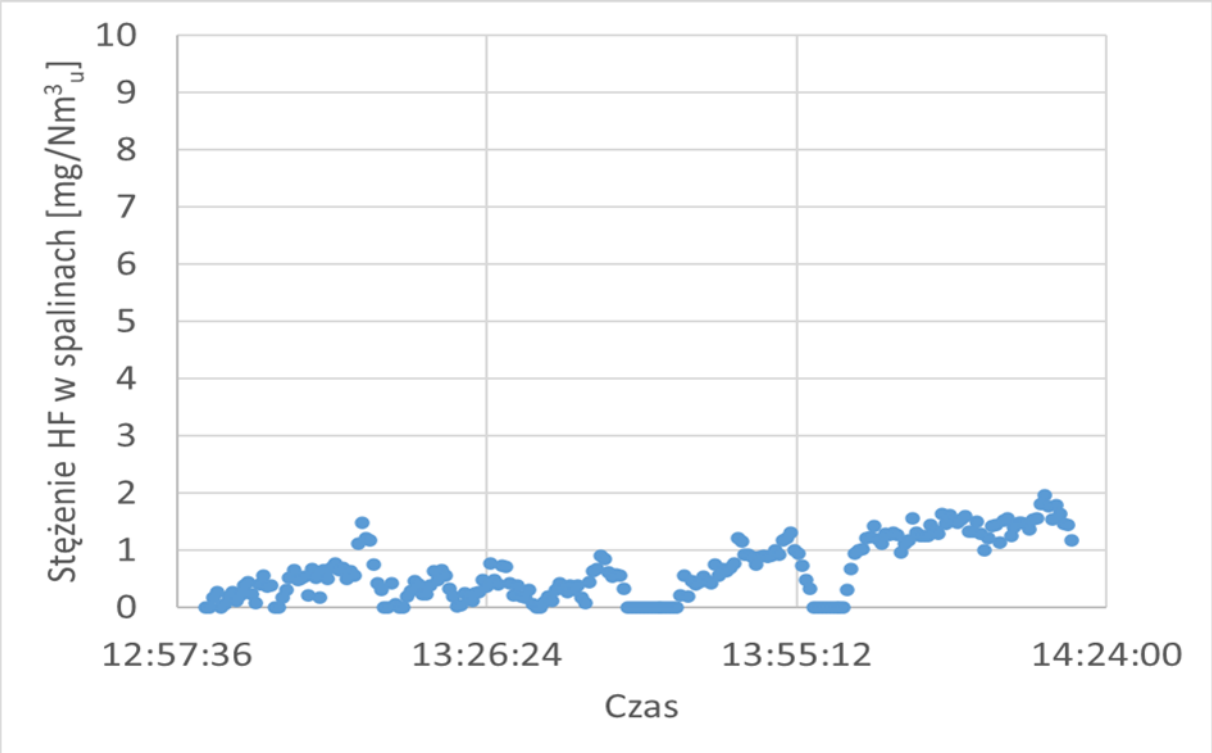
Rysunek 51 Stężenie HF w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



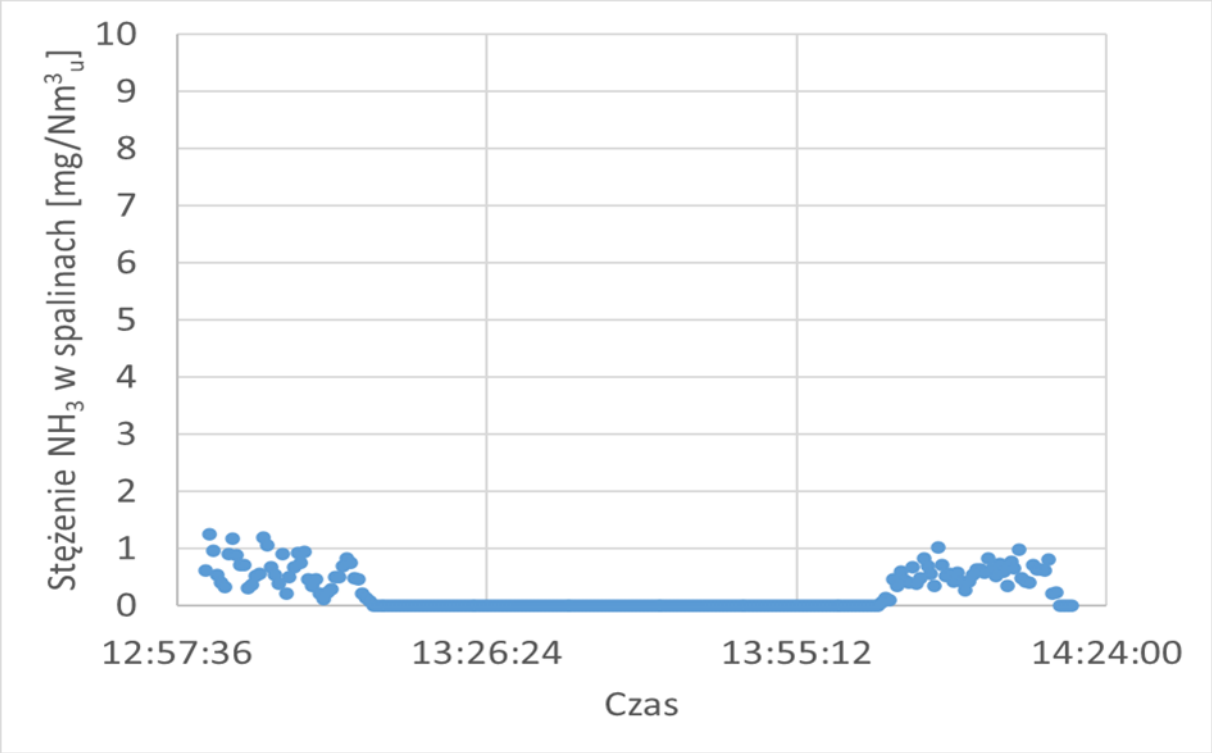
Rysunek 52 Stężenie NH_3 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania pierwszej serii pomiarowej



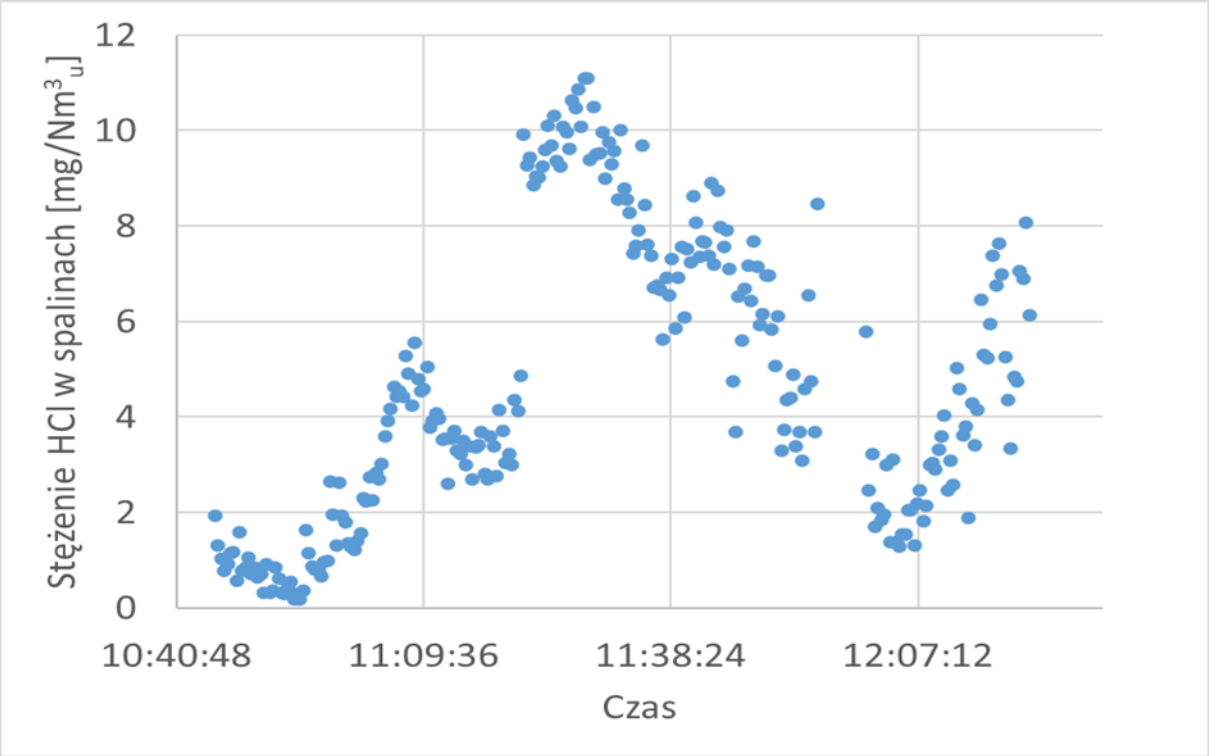
Rysunek 53 Stężenie HCl w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



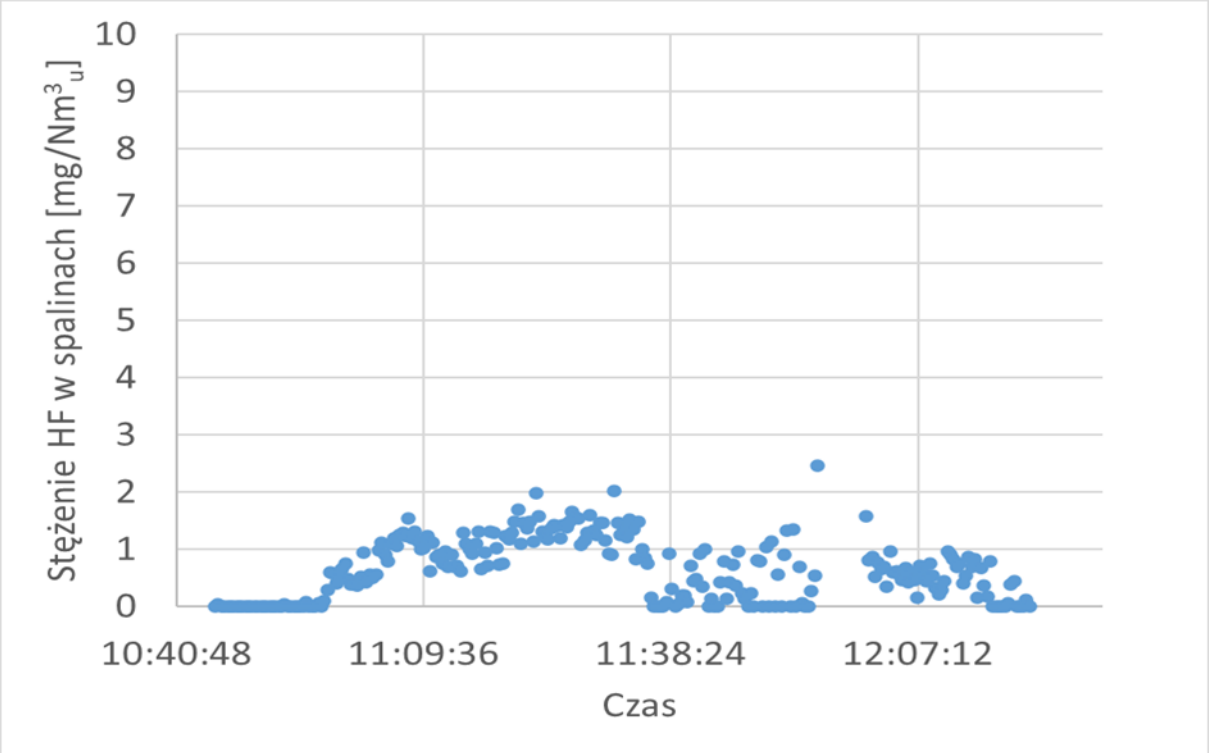
Rysunek 54 Stężenie HF w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



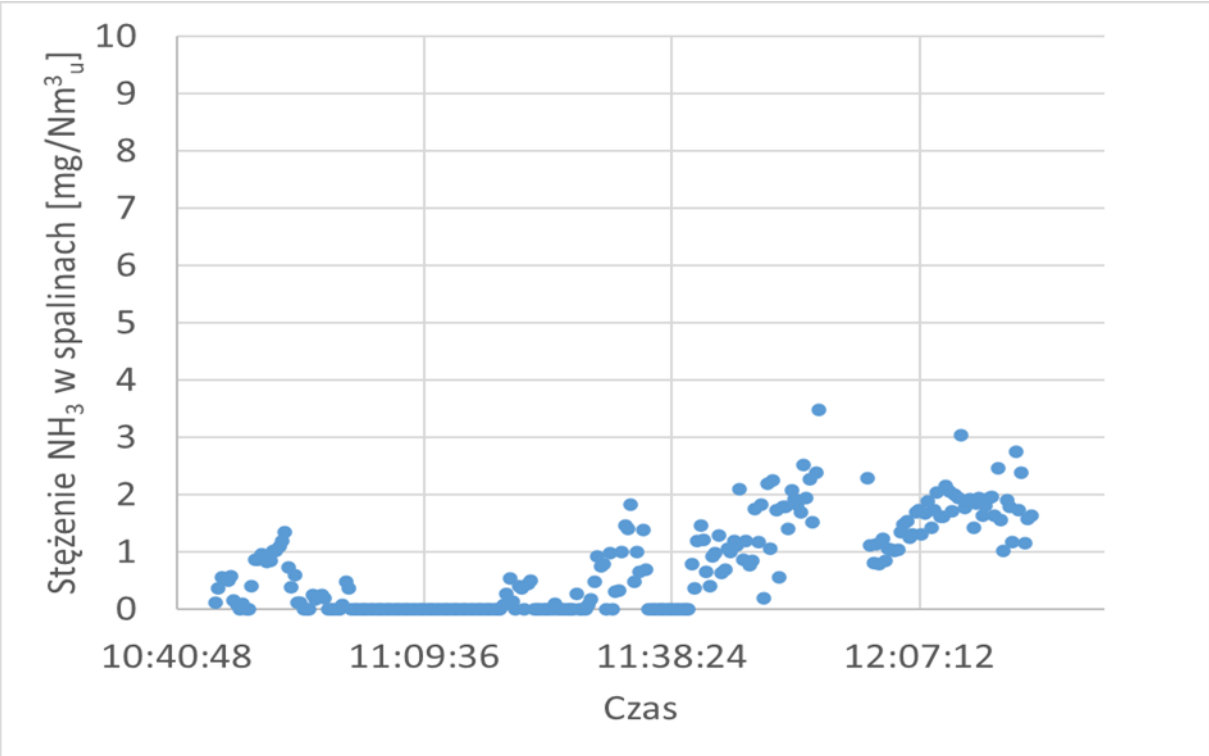
Rysunek 55 Stężenie NH_3 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania drugiej serii pomiarowej



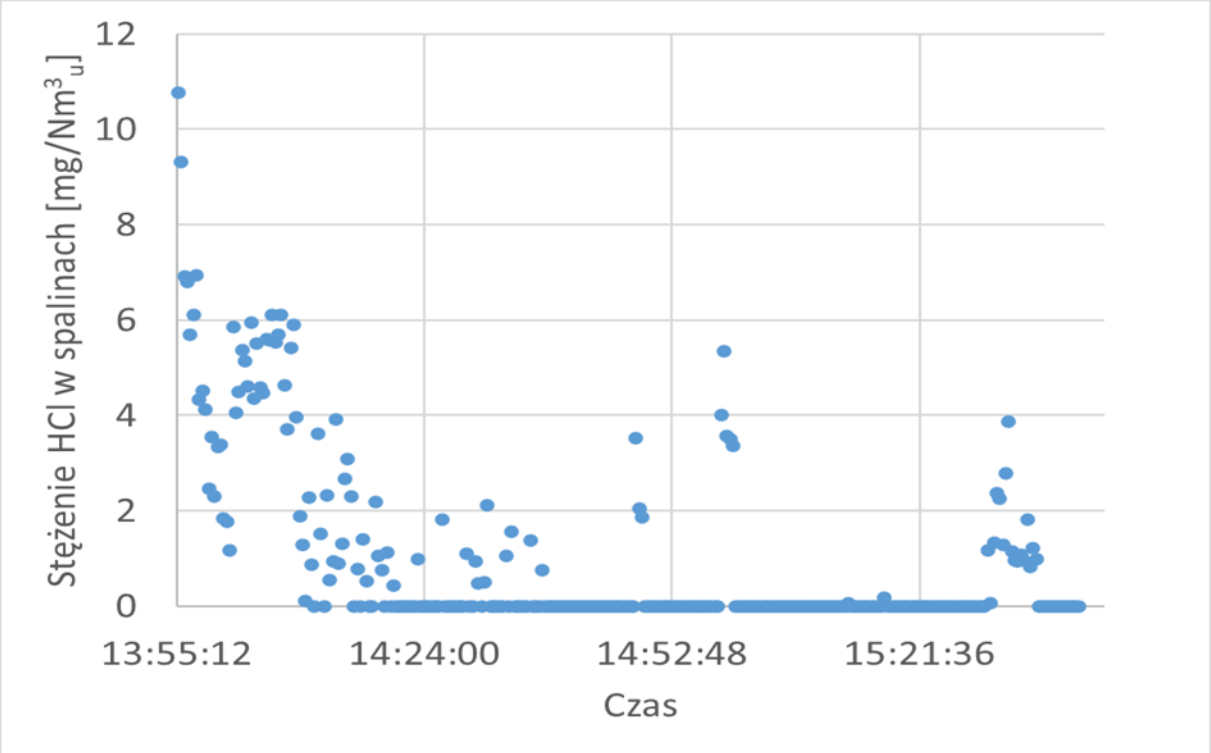
Rysunek 56 Stężenie HCl w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



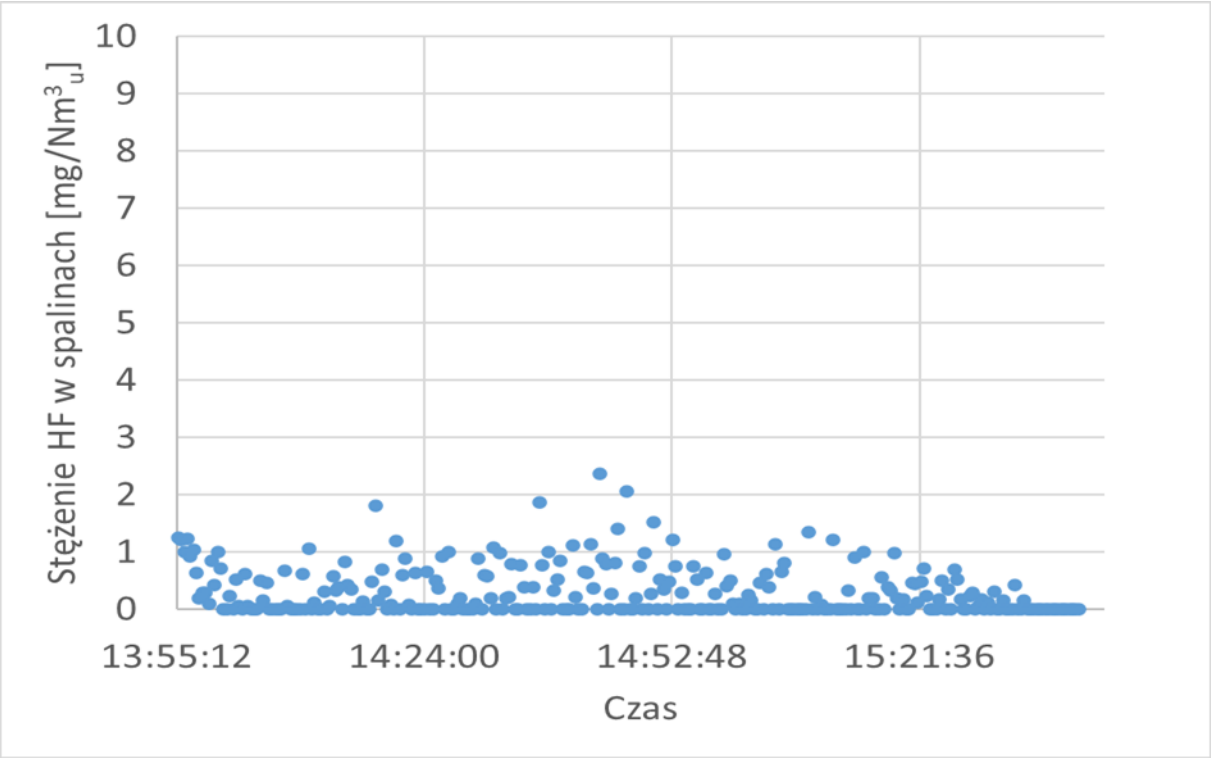
Rysunek 57 Stężenie HF w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



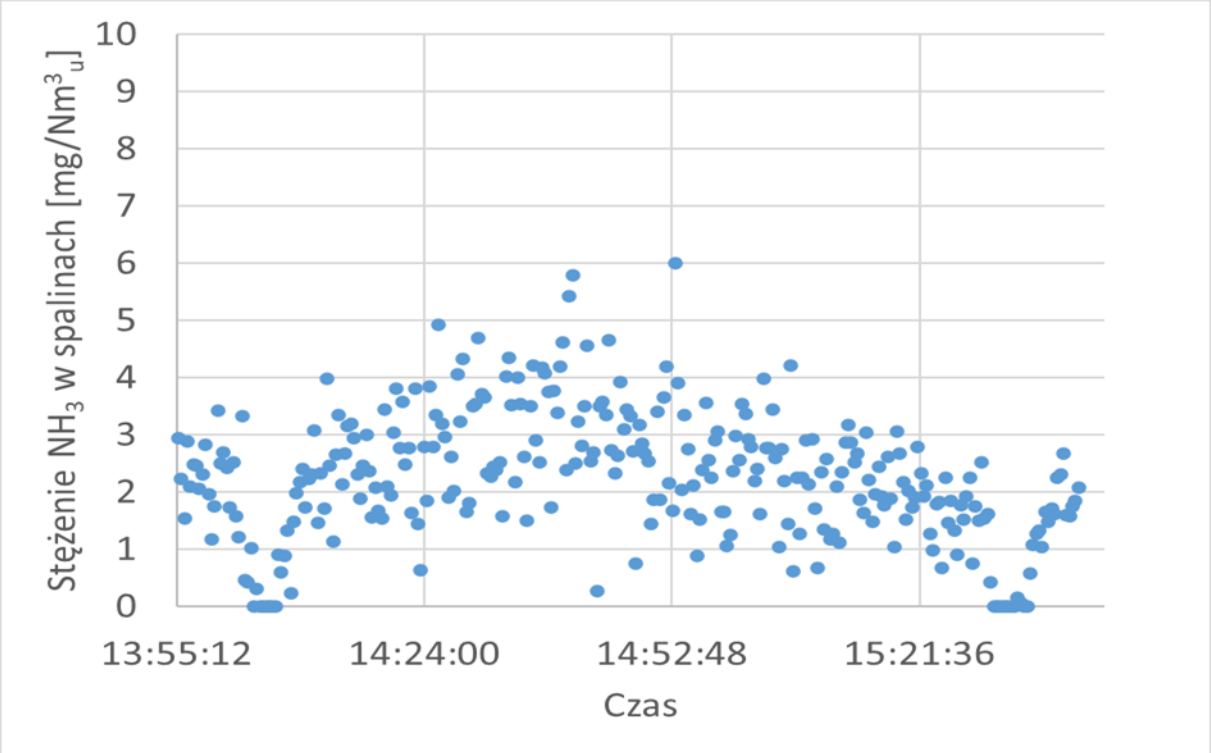
Rysunek 58 Stężenie NH_3 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania trzeciej serii pomiarowej



Rysunek 59 Stężenie HCl w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



Rysunek 60 Stężenie HF w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej



Rysunek 61 Stężenie NH_3 w spalinach w odniesieniu do spalin suchych oraz zawartości tlenu 10%, w czasie trwania czwartej serii pomiarowej