

OD CZEGO ZALEŻY RZECZYWISTA EMISJA?

RAPORT



EUROPEJSKIE
CENTRUM
CZYSTEGO
POWIETRZA

AUTORZY:

POLITECHNIKA WARSZAWSKA,
WYDZIAŁ INSTALACJI BUDOWLANYCH, HYDROTECHNIKI I INŻYNIERII ŚRODOWISKA:
DR HAB. INŻ. ARTUR BADYDA, PROF. UCZELNI

INSTYTUT OCHRONY ŚRODOWISKA, PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY:
DR INŻ. KRZYSZTOF SKOTAK

FUNDACJA EUROPEJSKIE CENTRUM CZYSTEGO POWIETRZA:
KATARZYNA MACIEJEWSKA, DOMINIKA MUCHA, ŁUKASZ ADAMKIEWICZ

SPIS TREŚCI

1 WSTĘP	3
2 RODZAJE BADAŃ EMISJI	4
2.1 Badania certyfikacyjne urządzeń grzewczych	4
2.2 Badania emisji rzeczywistych	6
2.2.1 Procedury prowadzenia procesu spalania - przykłady	6
2.2.2 Faza rozpalania	7
2.2.3 Jakość paliwa	8
3 FRAKCJE PYŁU: FILTROWALNA I KONDENSUJĄCA	10
4 TECHNIKA POMIAROWA EMISJI PYŁU	12
4.1 Rozgrzany filtr	12
4.2 Tunel rozcieńczający	12
5 WYBRANE WYNIKI BADAŃ POKAZUJĄCE RÓŻNICE WE WSKAŹNIKACH EMISJI	14
5.1 Metoda pomiarowa – rozgrzany filtr względem tunelu rozcieńczającego	14
5.2 Praca urządzenia – moc nominalna względem mocy zredukowanej	14
5.3 Procedura prowadzenia procesu spalania – badania certyfikacyjne względem oceny emisji rzeczywistej	14
5.4 Jakość paliwa – wysoka jakość względem niskiej	15
5.5 Podsumowanie wpływu parametrów badań na rzeczywiste wskaźniki emisyjne	15
6 MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA RZECZYWISTYCH WSKAŹNIKÓW EMISJI	17
7 REKOMENDACJE	18
8 BIBLIOGRAFIA	19



Wstęp

Określanie wielkości emisji zanieczyszczeń powietrza ze źródeł komunalno-bytowych opiera się o powszechnie przyjętą metodykę, polegającą – w uproszczeniu – na przemnażaniu **ilości paliw** zużywanych w tym sektorze (dane statystyczne) przez odpowiednie **wskaźniki emisyjne** (określone na podstawie laboratoryjnych pomiarów emisji z urządzeń). Podejście to obarczone jest znaczną niepewnością, zarówno na skutek niepewności metod opracowania i gromadzenia danych statystycznych, jak i ze względu na trudność w identyfikacji odpowiednich dla konkretnej sytuacji wskaźników emisji, czyli próby odzwierciedlenia jak najbardziej rzeczywistych warunków spalania paliw.

Niniejszy raport przedstawia **podsumowanie stanu wiedzy na temat pomiarów wskaźników emisji przede wszystkim pyłu zawieszonego**, pochodzącego z urządzeń spalających paliwa stałe, czyli głównie węgiel i biomasę (w szczególności drewno i pellet), wykorzystywanych w gospodarstwach domowych do celów grzewczych i produkcji ciepłej wody. W raporcie opisane zostały główne założenia oraz metody prowadzenia tego typu badań z punktu widzenia ich potencjału odzwierciedlenia – w sposób jak najbardziej zbliżony do rzeczywistych warunków – wskaźników emisji pochodzących z tego sektora. Wskazano najważniejsze czynniki wpływające na znaczną rozpiętość wartości tych wskaźników podawanych w literaturze i zaproponowano, jaki rodzaj wskaźników zdaniem autorów tego raportu, powinien być zastosowany do celów inwentaryzacji emisji w ramach zarządzania jakością powietrza. Celem opracowania jest także wskazanie rekomendacji w zakresie działań, które pozwolą na skuteczne obniżenie rzeczywistych emisji, zależnych od szeregu różnorodnych czynników.

Raport przygotowany został w oparciu o rozległy **przeгляд literatury (ponad 120 pozycji)**, przede wszystkim artykułów z recenzowanych, międzynarodowych czasopism naukowych oraz raportów renomowanych instytucji, a także dokumentów prawnych oraz norm. W pracy zacytowano te z nich, które zdaniem autorów zawierają najważniejsze i najszersze wnioski.

2 Rodzaje badań emisji

Badania emisyjności urządzeń grzewczych wykorzystywanych w sektorze komunalno-bytowym mogą być prowadzone z wykorzystaniem różnych metod i podejść, a stosowane techniki pomiarów powinny być dobierane pod kątem przyjętych założeń i zdefiniowanego celu, w jakim konkretne badanie jest prowadzone. Dwa podstawowe kierunki badań związane są z (1) **procedurami certyfikacyjnymi urządzeń grzewczych** oraz (2) **określeniem rzeczywistej emisji** związanej z eksploatacją danego urządzenia.

CERTYFIKACJA A RZECZYWISTA EMISJA

BADANIA W WARUNKACH RZECZYWISTYCH:

- » Prowadzone w różnych warunkach pracy urządzenia
- » Spalanie paliw o różnej jakości;
- » Uwzględniające DWIE frakcje pyłu: filtrowaną i kondensującą;
- » Pokazujące emisję najbliższą warunkom rzeczywistym.

BADANIA CERTYFIKACYJNE:

- » Spalanie prowadzone w optymalnych warunkach;
- » Wykorzystanie najlepszych jakościowo paliw;
- » Uwzględniające TYLKO frakcję filtrowalną pyłu;
- » Pokazujące potencjalnie najniższą możliwą emisję.

Jednym z oczekiwanych rezultatów badań emisji z urządzeń jest określenie tzw. **wskaźników emisji EF** (ang. *emission factor*). Wskaźnik emisji to pewna reprezentatywna wartość wiążąca ilość emitowanego zanieczyszczenia z ilością surowca/paliwa zużywanego w danym procesie, rzadziej z ilością powstającego produktu lub – w przypadku sektora transportu – z długością trasy pokonywanej przez pojazd. Zatem EF określa emisyjność źródła związanego z daną aktywnością: w przypadku domów jest to ogrzewanie, a w przypadku samochodów – podróż. Taki **wskaźnik** pomaga określić np. jak **dużo zanieczyszczeń powietrza wydostanie się z komina w ciągu roku** na skutek zaspokajania potrzeby utrzymania oczekiwanej temperatury pomieszczeń w domu. W przypadku badań emisji pochodzących ze spalania paliw w urządzeniach grzewczych w sektorze komunalno-bytowym, wskaźniki emisji wyrażane są najczęściej w jednostkach masy zanieczyszczenia w odniesieniu do jednostki energii dostarczonej w paliwie (np. [mg/MJ], [g/GJ]). Przedstawienie emisji na jednostkę energii pozwala porównać ze sobą różne paliwa, tj. węgiel, drewno, gaz, olej oraz źródła elektryczne, również z uwzględnieniem ich jakości.

2.1 BADANIA CERTYFIKACYJNE URZĄDZEŃ GRZEWCZYCH

Jest to podstawowy rodzaj badań, których metodyka opracowana została pod kątem testowania **zgodności urządzeń ze standardami emisyjnymi** i przyznania certyfikatów potwierdzających klasę ich emisyjności. Zasadniczym dokumentem wyznaczającym wymagania odnośnie emisji pochodzącej z kotłów o mocy nominalnej do 500 kW (w dolnej granicy tego przedziału mieszczą się moce kotłów wykorzystywanych najczęściej w gospodarstwach domowych) jest norma PN-EN 303-5:2012 [1], która obowiązuje od 2014 r. Wymogi tej normy dla najwyższej 5. klasy urządzeń określone zostały Rozporządzeniem Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 1 sierpnia 2017 r. w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe (Dz. U. 2017, poz. 1690 [2]) i wskazane jako obowiązkowe do spełnienia przez wszystkie urządzenia wprowadzane na rynek polski po 1 lipca 2018 r. W związku z tym przepisem prawnym, tylko takiej klasy kotły można od tej daty w Polsce legalnie kupić. Ponadto, Unia Europejska wprowadziła zapisami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego 2009/125/WE [3] (tzw. Dyrektywa Ecodesign/ Ekoprojekt), ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących projektowania produktów związanych z energią. Dla urządzeń grzewczych małej mocy (do 500 kW) wymagania te zostały określone w Rozporządzeniu Komisji UE 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. [4], które obowiązuje od 1 stycznia 2020 r. Natomiast dla ogrzewaczy pomieszczeń (np. kominków) uchwalono Rozporządzenie Komisji UE 2015/1185 z dnia 24 kwietnia 2015 r. [5].

Urządzenia trafiające na rynek podlegają testom zgodności z ww. wymogami, a procedury takich badań określa norma PN-EN 16510-1:2018-08 (Mieszaniowe urządzenia spalające paliwo stałe - Część 1: Wymagania ogólne i metody badań) [6]. Zgodnie z wymaganiami prawnymi, badania emisyjności pod kątem emisji cząstek stałych pyłu zawieszonego PM (ang. *particulate matter*) powinny być prowadzone **metodą rozgrzanego filtra (wskazana przepisami krajowymi w Polsce i większości innych państw UE jako obligatoryjna)** lub w tunelu rozcieńczającym.

Najważniejszą cechą **badania certyfikacyjnych jest wykazanie, w wystandaryzowanych i optymalnych warunkach pracy, zgodności parametrów osiągniętych przez urządzenie** (w tym wskaźników emisji zanieczyszczeń powietrza) z założonymi poziomami normatywnymi. Badania te, zgodnie z normą, prowadzone są tylko **w fazie stabilnej pracy urządzenia z mocą nominalną, czyli pomiary dotyczą warunków idealnych**. Natomiast w **rzeczywistych warunkach** użytkowania urządzeń na paliwa stałe z ręcznym podajnikiem bez zasobnika, **moc nominalna osiągnięta jest przez maksymalnie kilka tygodni w ciągu całego sezonu grzewczego**, zaś w pozostałym czasie urządzenia te pracują z niepełną/obniżoną mocą (co charakteryzuje się znacznie wyższymi emisjami niż parametry określone przy badaniach certyfikacyjnych). Problem ten jest natomiast w znacznej mierze minimalizowany w przypadku użytkowania kotłów automatycznych połączonych z buforem ciepła. Norma określa także wymogi jakościowe dla paliw stosowanych do testowania urządzeń. Podane w normie parametry charakteryzują wysokiej klasy (jakości) paliwa, często znacznie przewyższające średnią jakość paliw dostępnych na rynku. Na przykład, minimalna **wartość opałowa węgla** jaki może być wykorzystany do testów to **26,5 MJ/kg**, zaś dla **pelletu 16,9 MJ/kg**. Dla porównania, minimalna kaloryczność określona w tzw. standardach jakościowych paliw stałych wynosi dla węgla typu orzech 22 MJ/kg, a dla najlepszego węgla typu groszek premium 25 MJ/kg [11]. Drewno kawałkowe do badań certyfikacyjnych musi z kolei należeć do jednego z trzech gatunków (buk, grab lub brzoza) i cechować się niską wilgotnością: (15±3)%. W przypadku spalania drewna w warunkach domowych brak jest określonych na poziomie krajowym minimalnych parametrów jakościowych, jednak z obowiązujących tzw. uchwał antysmogowych¹ wynika obowiązek korzystania z drewna o niskiej wilgotności.

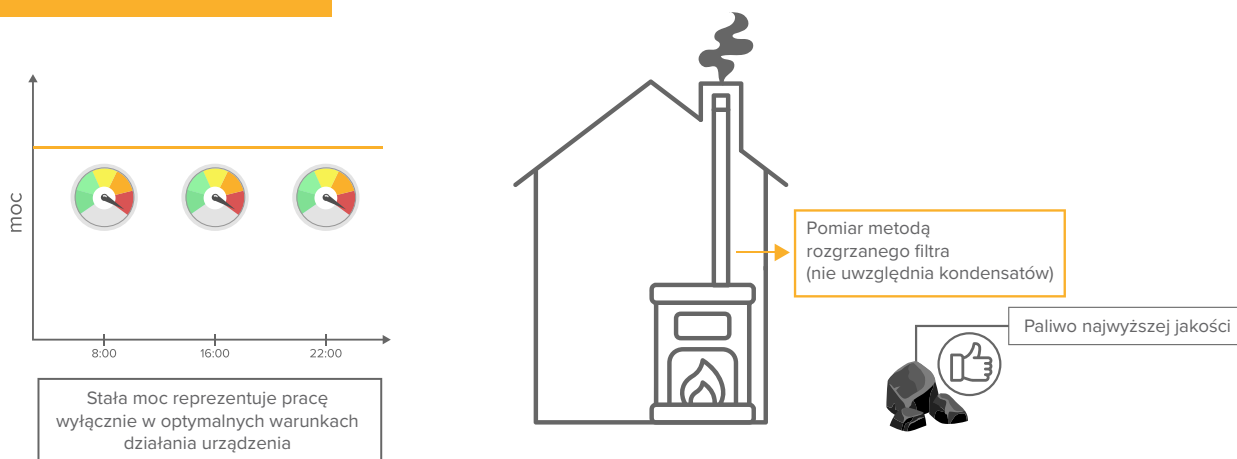
Badania certyfikacyjne pozwalają zatem określić wskaźniki emisyjne w **kontrolowanych** i zwykle **optymalnych warunkach** pracy badanego urządzenia.

W efekcie tak zmierzona emisja będzie **przeważnie znacznie niższa**, aniżeli określona **w warunkach rzeczywistych**, które nie zapewniają możliwości bieżącego kontrolowania procesu, ani jego powtarzalności.

Rysunek 1

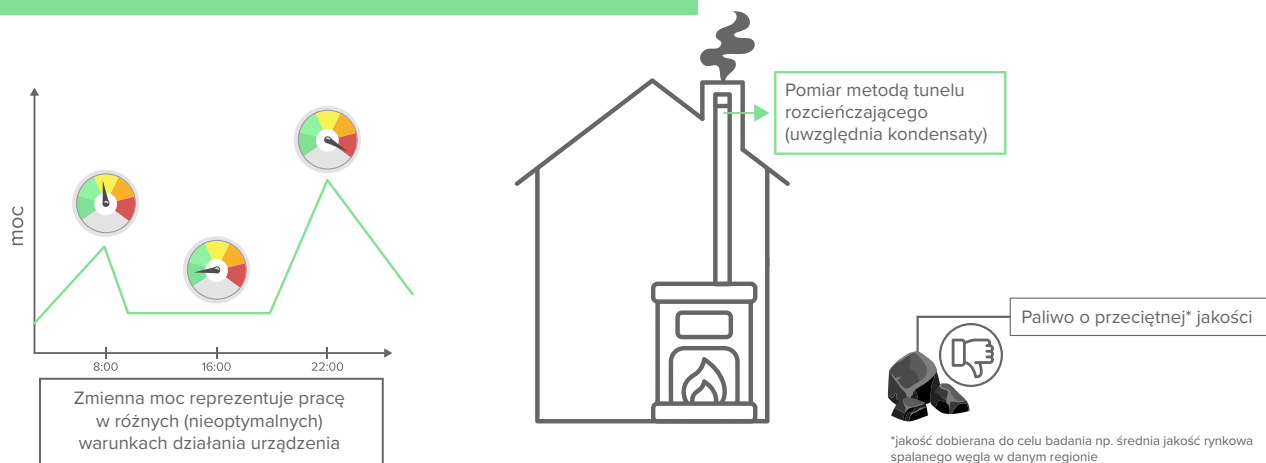
Najważniejsze cechy badań certyfikacyjnych w porównaniu z badaniami rzeczywistych emisji.

CERTYFIKACJA



¹Tzw. uchwały antysmogowe to akty prawa miejscowego powstające na mocy poprawki do art. 96 Ustawy Prawo Ochrony Środowiska, umożliwiającej samorządom (od 2015 r.) wprowadzanie ograniczeń lub zakazów w zakresie eksploatacji instalacji, w których następuje spalanie paliw, mających na celu zapobieżenie negatywnemu oddziaływaniu emisji z urządzeń grzewczych na zdrowie ludzi lub na środowisko.

BADANIE RZECZYWISTYCH EMISJI



2.2 BADANIA EMISJI RZECZYWISTYCH

Znając założenia wykonywania badań opisanych w poprzedniej sekcji raportu, naukowcy dążący do określenia jak najbardziej realistycznych wskaźników emisyjnych dla PM opracowali szereg metod i podejść, pozwalających na pełniejsze oszacowanie emisji powstających na skutek **praktycznego użytkowania urządzeń w warunkach rzeczywistych lub symulujących warunki jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych**. Atutem tych badań jest to, że mogą uwzględniać szereg zmiennych i nie są ograniczone wytycznymi norm, oraz w wielu wypadkach wykorzystują standaryzowane metody i urządzenia pomiarowe. Najważniejszymi elementami zmiennymi w tego rodzaju badaniach są:

- » Procedura prowadzenia procesu spalania, czyli sposób przyjęty przez autorów danego badania na **odzworowanie rzeczywistego sposobu użytkowania urządzenia** w warunkach laboratoryjnych². W szczególności procedura uwzględniająca zmienność obciążeń urządzenia (różne cykle pracy, zarówno z obciążeniem nominalnym jak i zredukowanym).
- » Możliwość uwzględniania lub wyłączenia z badań **fazy rozpalania** oraz (rzadziej) **fazy wygaszania**.
- » Możliwość zastosowania **różnej jakości i rodzaju używanego paliwa** (np. stosowanie różnych typów paliw stałych w jednym urządzeniu w celu porównania uzyskiwanych emisji).

2.2.1 PROCEDURY PROWADZENIA PROCESU SPALANIA - PRZYKŁADY

Na przestrzeni ostatnich lat zrealizowanych zostało kilka projektów mających na celu opracowanie i opisanie standardowych procedur, które mogłyby znaleźć szersze zastosowanie w badaniach rzeczywistych emisji i dostarczyć danych pozwalających na bardziej realistyczne oszacowanie wielkości emisji z sektora komunalno-bytowego.

Jednym z kluczowych badań był projekt BeReal (Advanced Testing Methods for Better Real Life Performance of Biomass Room Heating Appliances) [7], zrealizowany w ramach 7. Programu Ramowego Komisji Europejskiej. Projekt dotyczył testowania miejscowych ogrzewaczy pomieszczeń na pellet oraz kominków na drewno kawałkowe. Na podstawie ankietowych badań społecznych określono typowy profil użytkowania tego typu urządzeń (m.in. czas palenia, częstość dokładania kolejnych porcji paliwa, udziały czasu pracy z mocą nominalną i obniżoną), a następnie opracowano **protokół badawczy do stosowania w warunkach laboratoryjnych, pozwalający zasymulować quasi-rzeczywistą pracę ogrzewaczy i kominków**. W trakcie takiej procedury prowadzono ciągły pomiar emisji zanieczyszczeń gazowych oraz zastosowano okresowe próbkowanie spalin pod kątem zawartości zanieczyszczeń pyłowych, w ściśle określonych interwałach.

² W szczególnych przypadkach pomiary mogą być prowadzone w warunkach rzeczywistych, tj. wykorzystując istniejące instalacje grzewcze w gospodarstwach domowych i specjalnie przystosowane urządzenia pomiarowe. Jednak ze względu na szereg trudności towarzyszących takim badaniom są one relatywnie rzadko stosowane.

W przypadku kotłów grzewczych podobną procedurę (dedykowaną kotłom na drewno i pellet) opracowano w austriackim instytucie badawczym Bioenergy and Sustainable Technologies – BEST [8]. Główna teza badań opierała się o stwierdzenie, że w ciągu rocznego użytkowania kotła zmienia się – wraz z sezonami – zapotrzebowanie na ciepło, a więc także obciążenie z jakim urządzenie pracuje. Szereg przeprowadzonych analiz pozwolił na określenie typowego rocznego profilu pracy, który stanowił podstawę do opracowania protokołu badawczego dla urządzeń testowanych w laboratorium, pracujących przez określone części cyklu pomiarowego z różnymi obciążeniami. Można w ten sposób **odzworować cały rok pracy kotła i określić uśredniony wskaźnik emisyjny dla quasi-rzeczywistego użytkowania urządzenia**.

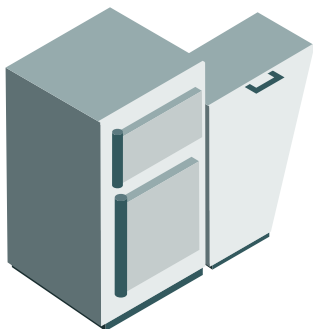
2.2.2 FAZA ROZPALANIA

W warunkach rzeczywistych faza rozpalania jest cyklicznie powtarzającą się fazą, charakteryzującą się przejściowymi wysokimi emisjami. **Wskaźniki emisji** określane **w fazie rozpalania** mogą osiągać poziomy nawet **kilkunastokrotnie wyższe niż w trybie pracy poza rozpalaniem** [9]. Udział czasu trwania faz rozpalania w stosunku do całego czasu użytkowania urządzeń grzewczych nie jest zwykle bardzo duży, jednak w przypadku urządzeń z ręcznym załadunkiem paliwa – a zwłaszcza kominków na drewno użytkowanych jako dodatkowe źródło ciepła – może w pewnych warunkach istotnie wzrastać.

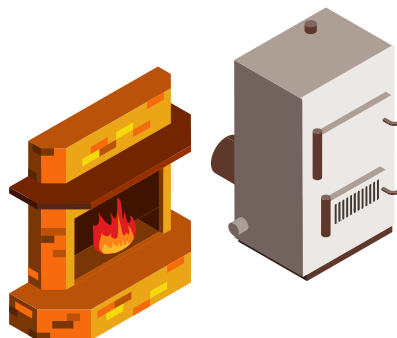
W takiej sytuacji, zwiększone emisje mogą stanowić znaczący wkład do całkowitej emisji z urządzenia, co powinno znaleźć odzwierciedlenie w realistycznym wskaźniku emisji. Kotły automatyczne charakteryzują się ciągłą pracą: faza rozpalania następuje w momencie uruchomienia urządzenia, a następnie niewielkie porcje paliwa są automatycznie podawane z zasobnika do komory spalania, stale podtrzymując proces spalania (pod warunkiem regularnego uzupełniania zasobnika paliwa – zwykle raz na kilka dni). Użytkowanie kotłów z **załadunkiem ręcznym oraz kominków wiąże się natomiast ze znacznie częstszym występowaniem fazy rozpalania**. Ponieważ w tym przypadku to użytkownik decyduje ile paliwa i w jakim momencie dołożyć, częściej dochodzi do wygaszenia paleniska (zwłaszcza w godzinach nocnych) i konieczności ponownego jego rozpalenia – czasami nawet kilka razy dziennie.

Rysunek 2

Typowe urządzenia automatyczne i manualne.



Kocioł automatyczny –
rzadkie fazy rozpalania (praca ciągła)



Kocioł ręczny, kominek –
częste fazy rozpalania

Pomiary w trakcie fazy rozpalania są dość trudne do precyzyjnego przeprowadzenia i charakteryzują się dużą zmiennością wyników. Z tych powodów faza rozpalania uwzględniana jest w procedurach badawczych niezwykle rzadko, gdyż może znacząco wpływać na zwiększenie niepewności wyniku końcowego badania. Warto jednak podkreślić jej potencjalny wpływ na całkowitą emisję końcową procesu spalania. **Publikacje naukowe potwierdzają potrzebę prowadzenia dalszych badań, aby dokładniej scharakteryzować ten proces, w tym poprawnie oszacować wielkość emisji.** Faza wygaszania bywa uwzględniana w pomiarach emisyjnych w taki sposób, że określony z góry parametr decydujący o tym kiedy zakończyć pomiar (np. progowe stężenie CO₂ w spalinach) dobierany jest na poziomie, który charakteryzuje końcową fazę procesu spalania. Z dostępnych badań wynika, iż faza wygaszania ma prawdopodobnie mniejszy wpływ na całkowitą emisję końcową niż faza rozpalania, ale w tym przypadku również potrzeba dalszych analiz ilościowych.

2.2.3 JAKOŚĆ PALIWA

Paliwa stałe wykorzystywane w domowych urządzeniach grzewczych charakteryzują się znaczną rozpiętością parametrów jakościowych, wpływających na ich kaloryczność oraz wielkość emisji zanieczyszczeń powietrza, w tym zwłaszcza pyłu.

We wrześniu 2018 r. wprowadzono prawnie w Polsce po raz pierwszy wymagania jakościowe dla paliw węglowych (Dz. U. 2018, poz. 1890) [10], zmienione następnie w grudniu 2022 r. Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2022 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz. U. 2022, poz. 2856) [11]. Rozporządzenie to określa minimalne wartości opałowe, zdolność spiekania, maksymalną zawartość siarki, popiołu i wilgoci, a także normuje wymiary ziaren i dopuszczalne zawartości podziarnia i nadziarnia dla każdego z sortymentów oraz rodzajów paliw węglowych dopuszczonych do sprzedaży detalicznej, a więc możliwych do spalania w instalacjach domowych.

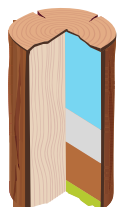
Wymagania te zostały określone dość łagodnie, na przykład minimalne wartości opałowe dla węgla kamiennego sortymentu **orzech i groszek to odpowiednio 22 MJ/kg i 21 MJ/kg**, podczas gdy wskaźniki emisyjne **w badaniach certyfikacyjnych** określa się przy użyciu węgla o wartości opałowej **min. 26.5 MJ/kg**. Podobnie w przypadku zawartości popiołu – dopuszczalne wartości dla sortymentu **orzech i groszek to odpowiednio 12% i 14%**, zaś węgiel do certyfikacji może go zawierać **maksymalnie 6±2%**. Oznacza to, że węgiel stosowany w praktyce przez użytkowników jest najprawdopodobniej gorszej jakości, niż ten dla którego przeprowadza się certyfikację kotłów. Należy nadmienić że w okresie **od 29 czerwca 2022 r. do 31 grudnia 2023 r. obowiązywanie norm jakościowych dla paliw stałych zostało zawieszono** (Dz. U. 2022, poz. 1351 [12], Dz. U. 2022, poz. 1786 [13], Dz. U. 2022, poz. 2186 [14], Dz. U. 2023, poz. 835 [15] oraz Dz. U. 2023, poz. 1494 [16]), co umożliwiło użytkowanie paliwa gorszej jakości.

W przypadku drewna najważniejszym parametrem wpływającym na emisyjność jest jego wilgotność. W Polsce nie istnieje żaden ogólnie obowiązujący akt prawny normujący dopuszczalną wilgotność drewna opałowego, niemniej jednak część tzw. uchwał antysmogowych wprowadza zakaz spalania drewna o wilgotności powyżej 20%, co w praktyce oznacza, że do urządzeń grzewczych powinno trafiać jedynie drewno odpowiednio długo sezonowane (**tuż po ścięciu wilgotność sięga ok. 50%, jej obniżenie do 20% wymaga sezonowania przez około 2 lata**). Ponieważ nie ma regulacji, które nakładałyby na producentów obowiązek przestrzegania wymagań jakościowych dostarczanego drewna opałowego, dotrzymanie wymogów uchwał antysmogowych w zakresie odpowiednio niskiej wilgotności paliwa leży po stronie użytkowników urządzeń grzewczych. Duża dostępność w niektórych regionach drewna i odpadów zielonych, pochodzących nierzadko z prywatnych lasów i sadów, powoduje częste wykorzystywanie w celach opałowych biomasy krótko- lub niesezonowanej, przekraczającej dopuszczalny poziom wilgotności, co sprawia że rzeczywiste emisje są znacznie wyższe niż szacunki oparte o wskaźniki emisyjne określone dla drewna suchego.

Rysunek 3

Zmiana właściwości drewna opałowego na skutek sezonowania*

1 kg drewna

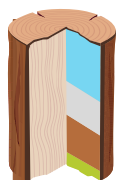


W = 0,500 kg = 50%
O = 0,218 kg = 21,8%
C = 0,247 kg = 24,7%

wartość opałowa: 8,0 MJ/kg
ciepło spalania: 9,9 MJ/kg
niska wartość opałowa

**Świeżo ścięte drewno
(50% wody)**

0,714 kg drewna



W = 0,214 kg = 30,0%
O = 0,218 kg = 30,5%
C = 0,247 kg = 34,6%

wartość opałowa: 12,2 MJ/kg
ciepło spalania: 13,9 MJ/kg
wzrost wartości opałowej o 53%

**Drewno suszone 1/2 do roku
(30% wody)**

0,625 kg drewna



W = 0,125 kg = 20,0%
O = 0,218 kg = 34,9%
C = 0,247 kg = 39,6%

wartość opałowa: 14,3 MJ/kg
ciepło spalania: 15,8 MJ/kg
wzrost wartości opałowej o 79%

**Drewno suszone 1 do 2 lat
(<20% wody)**

W – woda
A – popiół
h – część organiczna (palna)
O – tlen
C – węgiel
H – wodór
N – azot
S – siarka

**W + A + h = 1
h = C + H + S + O + N**

*Opracowano na podstawie grafiki Centre for Energy and Environmental Technologies, Technical University of Ostrava (<https://populair.sk/web-documents/167/suseni-dreva.jpg>)

Rosnącą popularność zyskuje na rynku pellet. Pellet to paliwo w postaci granulatu produkowanego z biomasy - odpadów drzewnych, uprawianych w tym celu roślin, oraz odpadów i produktów ubocznych rolnictwa. Pellet przeznaczony do użytku nieprzemysłowego powinien być wytwarzany bez dodatku jakichkolwiek lepiszczy, a jego spoiwo stanowić wyłącznie lignina pochodząca z drewna.

Wysokiej jakości pellet drzewny, spalany w dedykowanych automatycznych kotłach lub piecach, charakteryzuje się relatywnie niską emisyjnością zanieczyszczeń powietrza w porównaniu do innych paliw stałych. Wielu producentów tego paliwa decyduje się na poddanie go procedurze certyfikacji w celu uzyskania znaku jakości EN plus, zgodnie z normą EN ISO 17225-2:2021-10 (Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy - Część 2: Klasy peletów drzewnych) [17]. Najwyższe standardy spełnia klasa A1 i tylko taki pellet jest dedykowany do spalania w instalacjach domowych. **Certyfikacja pelletu nie jest jednak w Polsce obowiązkowa**, a zatem do sprzedaży trafiać może również pellet o znacznie gorszych parametrach, w tym potencjalnie zawierający domieszkę odpadów np. plastikowych. Wprowadzanie do obrotu paliwa zawierającego odpady jest oczywiście łamaniem prawa, jednak w obliczu braku obowiązku certyfikacji pelletu nabywcy mogą być nieświadomi, że nie jest to jedynie pellet nieco niższej jakości, lecz tak naprawdę odpad, którego spalanie jest nielegalne na mocy przepisów Ustawy o odpadach. Spalanie takiego paliwa prowadzi do zwiększenia emisji rzeczywistej podstawowych zanieczyszczeń powietrza (w tym pyłu zawieszonego i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych takich jak np. benzo(a)piren) w stosunku do założeń opartych o wskaźniki EF dla pelletu certyfikowanego, a także skutkować może uwolnieniami innych, potencjalnie toksycznych substancji.

3 Frakcje pyłu: filtrowalna i kondensująca

Pył powstający podczas spalania paliw stałych w urządzeniach grzewczych można sklasyfikować z uwzględnieniem **dwóch frakcji** – tzw. **frakcji filtrowalnej** (FPM) oraz **frakcji kondensującej** (CPM). **Pierwsza** z nich jest obecna w spalinach w momencie ich **wydostawania się z komory spalania**, i w przypadku spalania paliw stałych stanowi w głównej mierze **mieszalinę cząstek sadzy oraz niepalnej materii mineralnej**.

W bardzo gorących i nierozcieńczonych spalinach tuż za kotłem/kominkiem obecna jest także znaczna ilość gazowych substancji organicznych OGC (ang. Organic Gaseous Compounds), które, po pokonaniu przewodu kominowego i wydostaniu się na zewnątrz, niemal natychmiast po zetknięciu się ze znacznie chłodniejszym powietrzem atmosferycznym kondensują na powierzchni cząstek pyłowych (głównie sadzy), **powodując istotne zwiększenie masy pyłu, a tym samym zmieniając wskaźnik emisyjny** (wyrażany w jednostce masy zanieczyszczenia na jednostkę energii dostarczonej w paliwie: [g/GJ]) [18]. Jest to **druga frakcja pyłu** powstająca w wyniku spalania paliw stałych.

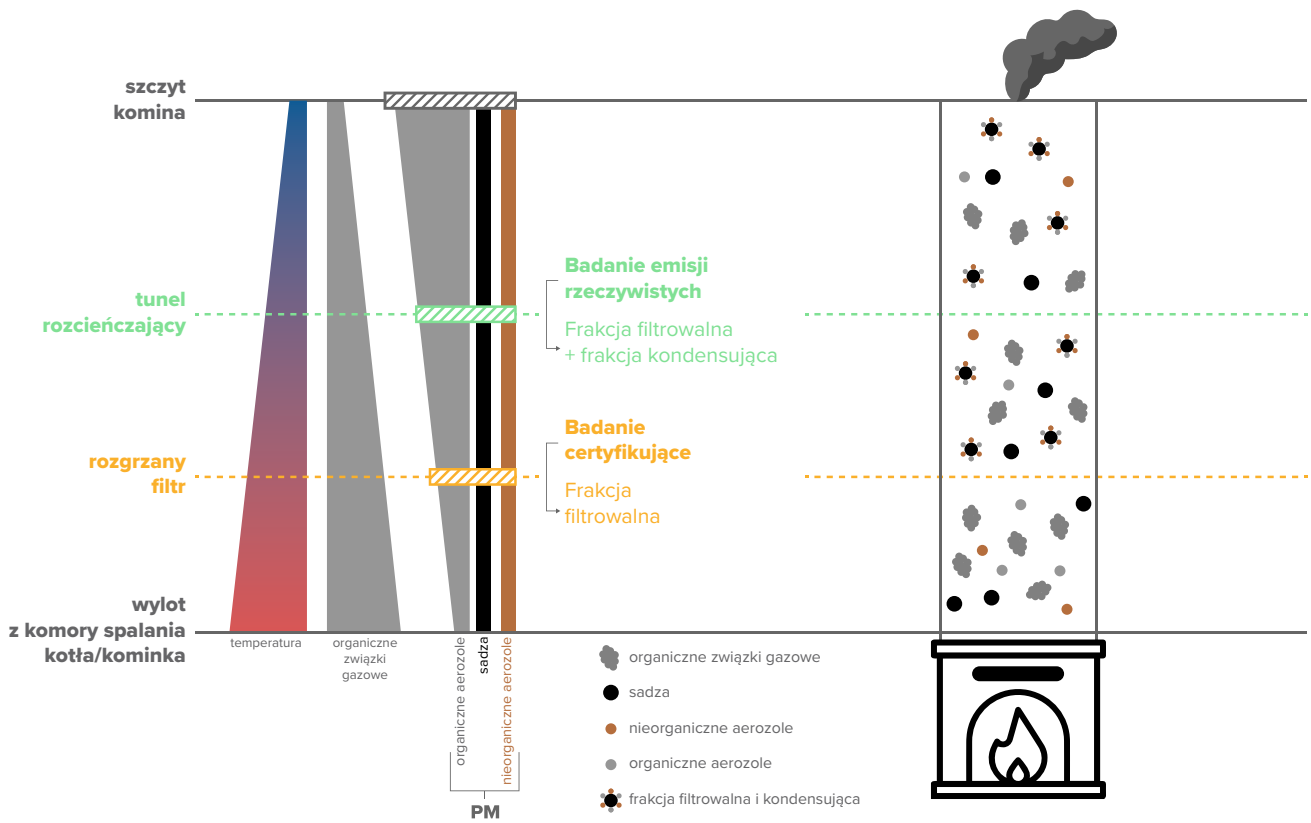
Z punktu widzenia oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza istotny jest pył **będący sumą emisji pochodzącej z frakcji filtrowalnej i kondensującej**, który wydostając się z komina podlega dalszemu rozprzestrzenianiu się w atmosferze. Uwzględnienie frakcji kondensującej w bilansie emisji pyłu więc jest bardzo istotną kwestią, zwłaszcza w przypadku spalania biomasy, która charakteryzuje się znacznymi uwolnieniami tzw. kondensatów. Obecne standardy pomiarowe emisji w Polsce, podobnie jak w wielu innych krajach, wymagają **pomiaru jedynie frakcji filtrowalnej, bez konieczności uwzględniania kondensatów**. Tym samym **niedoszacowana jest rzeczywista emisyjność źródeł na paliwa stałe**, zwłaszcza w przypadku spalania biomasy, która charakteryzuje się dużą zawartością substancji organicznych. Na arenie międzynarodowej trwają obecnie prace nad opracowaniem ujednoczonej metody pozwalającej na określanie emisji całkowitej z uwzględnieniem frakcji kondensującej [19].

Schemat obrazujący różnicę w pomiarze emisji rzeczywistej (uwzględniający frakcję kondensującą) względem pomiaru certyfikującego (bez frakcji kondensującej) przedstawia poniższy rysunek. W wysokiej temperaturze (metoda certyfikacyjna) obecna jest przede wszystkim frakcja filtrowalna pyłu (złożona z aerozoli nieorganicznych i sadzy). Przy obniżonej temperaturze spalin (metoda tunelu rozcieńczającego) organiczne związki gazowe kondensują do organicznych aerozoli i zostają uwzględnione w mierzonym pyłe (PM) jako frakcja kondensująca.

Rysunek 4

Wpływ temperatury spalin na możliwe do zmierzenia stężenia pyłu*.

*Opracowano na podstawie: Schön C. and Hartmann H. Status of PM measurement methods and new developments. IEA Bioenergy Technical report, 2018.



4 Technika pomiarowa emisji pyłu

W związku z opisanym powyżej rozróżnieniem, istnieją dwie podstawowe metody stosowane do pomiarów emisji pyłu, z technicznego punktu widzenia różniące się przede wszystkim miejscem poboru próbek.

4.1 ROZGRZANY FILTR

W metodzie rozgrzanego filtra, pobór próbek do określenia wskaźnika emisyjnego dla pyłu następuje **tuż za komorą spalania**, z gorących i nierozcieńczonych spalin. Próbka spalin pobierana jest przez urządzenie w określonym czasie (najczęściej jest to 30 minut) przy ustalonym przepływie powietrza. Stała (filtrowalna) frakcja pyłu zatrzymywana jest na filtrze kwarcowym. Tunel pobornika oraz filtr podgrzewane są do temperatury z zakresu pomiędzy 70°C a 160°C. Stężenie pyłu w spalinach określane jest jako iloraz (dzielenie) masy zebranego na filtrze pyłu przez objętość przepuszczonych przez ten filtr spalin i następnie przeliczane w odniesieniu do jednostki masy paliwa lub energii dostarczonej w paliwie.

Metoda ta pozwala na **pomiar wyłącznie pyłu** z tzw. frakcji filtrowalnej, **pomija** natomiast fakt istnienia **frakcji kondensującej**.

Procedura badawcza jest ściśle określona normą [6], a podstawowy schemat pomiarowy nie jest skomplikowany i ogranicza się do zapewnienia optymalnych warunków pracy urządzenia zasilanego określonym paliwem spełniającym zadane kryteria jakościowe. Jest to metoda wykorzystywana przez akredytowane laboratoria do certyfikacji (określania klasy emisyjności) urządzeń zgodnie z normą [1].

Wyniki tego typu badań są najszerzej dostępne i przez to najczęściej wykorzystywane do określania **wielkości emisji powstającej na skutek eksploatacji danego typu urządzeń**. Jak wspomniano wcześniej, **metoda ta w znacznym stopniu zaniża szacowane emisje w stosunku do emisji rzeczywistych** ze względu na nieuwzględnienie frakcji kondensującej pyłu.

4.2 TUNEL ROZCIEŃCZAJĄCY

Głównym celem tej metody jest doprowadzenie do schłodzenia i rozcieńczenia gazów odlotowych z urządzeń grzewczych przed pobraniem z nich próbek do określenia wskaźnika emisyjnego dla pyłu. **Proces ma za zadanie symulowanie emisji wydostającej się z komina**. W tym celu metoda pomiarowa wymaga podłączenia (w miejscu wylotu spalin z badanego urządzenia grzewczego) przewodu o długości rzędu kilkunastu metrów, do którego wpompowywane jest powietrze w temperaturze otoczenia. Mieszanka spalin i powietrza przebywa drogę w kierunku wylotu z tunelu rozcieńczającego, osiągając temperaturę rzędu 30°C-50°C w końcowej części przewodu, skąd pobierane są próbki do analiz.

Dzięki takiemu podejściu możliwe jest uwzględnienie zachodzących procesów kondensacji (patrz rozdział 3), a zatem zmierzenie **sumy frakcji filtrowalnej (FPM) i frakcji kondensującej (CPM)**. Podobnie jak w metodzie rozgrzanego filtra, próbka spalin pobierana jest ze stałą prędkością przepływu, a frakcje FPM i CPM zatrzymywane są zwykle na dwóch filtrach z włókna szklanego. Warunki poboru próbek wraz z filtrami wymagają utrzymania temperatury otoczenia lub nieznacznego podgrzania tak by osiągnąć temperaturę równą temperaturze rozcieńczonych i schłodzonych spalin. Stężenie pyłu w spalinach określa się podobnie jak w przypadku metody z rozgrzanym filtrem, jako iloraz (dzielenie) masy zebranego pyłu na filtrach przez zmierzoną w tym samym czasie objętość spalin przed rozcieńczeniem, a następnie przeliczając je w odniesieniu do jednostki masy paliwa lub energii dostarczonej w paliwie.

Metoda tunelu rozcieńczającego jest wyspecyfikowana w normie [6], która podaje m.in. wymiary tunelu, zakres prędkości gazów w tunelu oraz zakres stosunku rozcieńczenia spalin powietrzem. Ponieważ metoda ta w większości krajów nie jest obligatoryjna dla celów certyfikacji, zespoły badawcze stosują ją głównie dla celów naukowych i w zależności od celu badań, mogą wprowadzać do niej pewne modyfikacje, co skutkuje uzyskiwaniem zwykle większej zmienności wskaźników emisji (EF, ang. emission factor) niż w przypadku pomiarów metodą rozgrzanego filtra.

Poza wspomnianą normą, specyfikację parametrów metody tunelu rozcieńczającego określa także Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (USEPA) w dokumentacji dla procedury 5G: Method 5G – Determination of Particulate Matter Emissions From Wood Heaters (Dilution Tunnel Sampling Location) 8-3-2017 [20].

Należy nadmienić, że stosowane w Polsce przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE), na potrzeby krajowej inwentaryzacji emisji, wskaźniki emisyjne pyłu ze spalania paliw stałych dla urządzeń grzewczych w sektorze komunalno-bytowym zostały opracowane przez Instytut Technologii Paliw i Energii (ITPE), dawniej Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla (IChPW). Wskaźniki te opracowane zostały na podstawie danych literaturowych oraz wyników przeprowadzonych pomiarów wg autorskiej metody badawczej, która zakłada pomiar frakcji FPM metodą rozgrzanego filtra, a następnie uwzględnienie frakcji pyłu kondensującego CPM, której pomiar oparty jest o pomiar stężenia związków organicznych (przy wykorzystaniu zestawu szklanych płuczek wyposażonych w sorbenty związków organicznych). Badania takie wykonane zostały w ITPE dla wybranych typów urządzeń niespełniających wymogów klasy 5, ani ecodesign. Emisję CPM dla najnowszych urządzeń oszacowano na podstawie stosunków CPM/FPM dla urządzeń starszego typu.

5

Wybrane wyniki badań pokazujące różnice we wskaźnikach emisji

Przeprowadzony przez autorów przegląd publikowanych w literaturze światowej wyników badań z ostatnich dwóch dekad wykazał bardzo dużą rozpiętość raportowanych wartości wskaźników emisji pyłu zawieszonego (PM).

5.1 METODA POMIAROWA – ROZGRZANY FILTR WZGLĘDEM TUNELU ROZCIĘCZAJĄCEGO

Jak wynika z powyższych rozważań, kluczową rolę w poprawnym wyznaczeniu wskaźników EF odgrywa wybór metody pomiarowej, niemniej jednak tylko nieliczne prace porównują wskaźniki uzyskiwane obiema metodami dla tych samych urządzeń, ich parametrów pracy oraz stosowanych paliw. W artykule Klauser i in. z 2018 r. [21] pokazano, że dla 10 różnych urządzeń wskaźniki emisji całkowitego pyłu zawieszonego (TSP) mierzone **metodą tunelu rozcieńczającego** były od ok. **150% do ponad 350%** wyższe niż te określone z wykorzystaniem **metody rozgrzanego filtra**.

5.2 PRACA URZĄDZENIA – MOC NOMINALNA WZGLĘDEM MOCY ZREDUKOWANEJ

Kolejną zmienną poza wyborem metody obliczeniowej do wyznaczania wskaźników EF jest obciążenie urządzenia grzewczego. Wyniki badania Boman i in. z 2011 r. [24] dowodzą, że wskaźniki emisyjne dla TSP (całkowity pył zawieszony, ang. total suspended particles) określane dla ogrzewaczy na pellet pracujących z mocą obniżoną do ok. 30% mocy nominalnej, są około 200% wyższe niż EF zmierzone dla tych samych urządzeń pracujących z pełnym obciążeniem. W badaniu Tomsej i in. z 2018 r. [25] wskaźnik emisji TSP uzyskany dla spalania drewna brzoźowego w kotle niespełniającym wymogów 3. klasy był ponad 500% wyższy w przypadku zredukowanego obciążenia w porównaniu do pracy z mocą nominalną. Badania Krpec i in. z 2016 r. [26] potwierdzają, że praca ze zredukowaną mocą szczególnie silnie wpływa na wzrost emisji PM z kotłów manualnych starego typu.

W przypadku EF dla $PM_{2,5}$ pochodzącego ze spalania suchego drewna świerkowego wzrost ten jest rzędu od 300% do 700%. Znacznie lepsze wyniki uzyskiwane są natomiast dla nowoczesnych kotłów automatycznych, gdzie praca z obniżoną mocą powoduje wyraźnie mniejszy wzrost EF dla $PM_{2,5}$, tj. o 35%-90% przy spalaniu węgla brunatnego i o 25%-80% przy spalaniu pelletu.

5.3 PROCEDURA PROWADZENIA PROCESU SPALANIA – BADANIA CERTYFIKACYJNE WZGLĘDEM OCENY EMISJI RZECZYWISTEJ

Powszechnie wiadomym jest, że w warunkach rzeczywistych urządzenia grzewcze nie pracują przez cały czas z mocą nominalną, jednak również nie cały czas z mocą obniżoną. Wspomniane w rozdziale 2.2 procedury realistycznego odwzorowania pracy urządzeń w trakcie pomiarów laboratoryjnych pomagają określić wskaźniki emisyjne dla zmiennego trybu pracy. W raporcie z 2016 r., podsumowującym wyniki projektu BeReal [7], podano, że dla kominków i ogrzewaczy na drewno wskaźniki emisyjne dla pyłu (mierzone metodą rozgrzanego filtra) uzyskiwane przy zastosowaniu opracowanej **realistycznej procedury palenia mogą być do 400% wyższe niż uzyskiwane w testach typu certyfikacyjnego**, nieuwzględniającego podobnych protokołów. **W przypadku kotłów pelletowych** rozbieżność ta jest nieco mniejsza – wynosi **około 200%** ([27], [28]).

Wpływ na uzyskiwane wyniki ma także fakt, czy pomiary prowadzone są dla pracy urządzenia rozpoczynającej się od zupełnie **wychłodzonej komory spalania**, czy też po załadunku paliwa do już rozgrzanego urządzenia – różnice w przypadku **kominków i ogrzewaczy na drewno**, w zależności od zastosowanego rodzaju drewna wynoszą od **50% do 500%** [29].

5.4 JAKOŚĆ PALIWA – WYSOKA JAKOŚĆ WZGLĘDEM NISKIEJ

Bardzo istotne znaczenie dla emisyjności urządzeń ma także jakość stosowanego paliwa. Wiele badań dotyczy porównania wskaźników emisji uzyskiwanych dla **mokrego oraz suchego drewna**. W przypadku pozaklasowych kotłów o ręcznym załadunku, zastosowanie **mokrego drewna** powoduje **wzrost wskaźników emisji dla $PM_{2,5}$ o 400-500%**, przy pracy urządzenia z mocą nominalną. Jednoczesne zastosowanie **drewna mokrego i obniżenie mocy** kotła prowadzi do uzyskania wskaźników o **800-900% wyższych** niż w sytuacji wyjściowej ([26], [30]).

Pellety charakteryzują się generalnie najniższymi wskaźnikami emisyjnymi spośród paliw stałych. Niemniej jednak, ich emisyjność także zależy od parametrów jakościowych, a w szczególności od tego z jakiego rodzaju biomasy są wykonane. Według badań Vicente i in. z 2015 r. [31], **spalanie pelletu** wykonanego z lignocelulozy zmieszanej z wiórami z produkcji mebli generuje o **300-400% wyższe wskaźniki emisyjne** dla pyłu PM_{10} niż w przypadku **pelletu certyfikowanego**, zaś dla **pelletu z biomasy odpadowej** pochodzącej z przemysłu spożywczego (np. pestki oliwek, łupiny migdałów i innych orzechów) EF dla PM_{10} jest o ok. **500% wyższy niż dla paliwa z certyfikatem**.

W przypadku węgla istnieje bardzo niewiele badań porównujących bezpośrednio wskaźniki emisyjne uzyskiwane dla różnych parametrów jakościowych węgla spalanego w instalacjach domowych. Najczęstszym rozróżnieniem w przypadku węgla kamiennego jest jego typ: **węgiel bitumiczny vs. antracyt**. Te dwa rodzaje węgla różnią się zawartością pierwiastka węgla (odpowiednio ok. 75%-80% względem > 90%), zawartością części lotnych (12%-15% względem <10%) a także wartością opałową (24-28 MJ/kg względem >30 MJ/kg). Jak podają Li i in. [32] EF dla pyłu **$PM_{2,5}$ ze spalania węgla bitumicznego jest o ok. 400% wyższy niż dla antracytu w przypadku nowoczesnego kotła i o ponad 1800% wyższy w przypadku tradycyjnego kotła ręcznego**. Polskie badania z roku 2019 [33] dotyczyły porównania wskaźników emisyjnych ze spalania surowego węgla sortymentu groszek oraz z tzw. węgla bezdymnego („błękitnego”), będącego pochodną zwykłego węgla, poddanego procesowi podobnemu do koksowania w celu uzyskania paliwa o niższej emisyjności. Dla pyłu TSP wskaźniki emisji uzyskiwane ze spalania (w tym samym kotle o ręcznym załadunku) **węgla surowego** (przed obróbką) były o około **500-1000% wyższe niż w przypadku paliwa bezdymnego**.

5.5 PODSUMOWANIE WPŁYWU PARAMETRÓW BADAŃ NA RZECZYWISTE WSKAŹNIKI EMISYJNE

Określenie pojedynczego (uniwersalnego) wskaźnika emisji dla urządzenia grzewczego jest bardzo trudne, gdyż jak wspomniano powyżej istnieje wiele parametrów powodujących znaczące zróżnicowanie wśród emisyjności źródeł na paliwa stałe (węgiel i biomasa). Szczególnie dużą zmiennością charakteryzują się wyniki uzyskiwane w badaniach spalania biomasy. W przeglądowym artykule Vicente i Alves z 2018 r. [22], uwzględniającym dane pochodzące z około 300 artykułów i raportów, podano następujące zakresy EF dla pyłu zawieszonego (mierzone metodą tunelu rozcieńczającego):

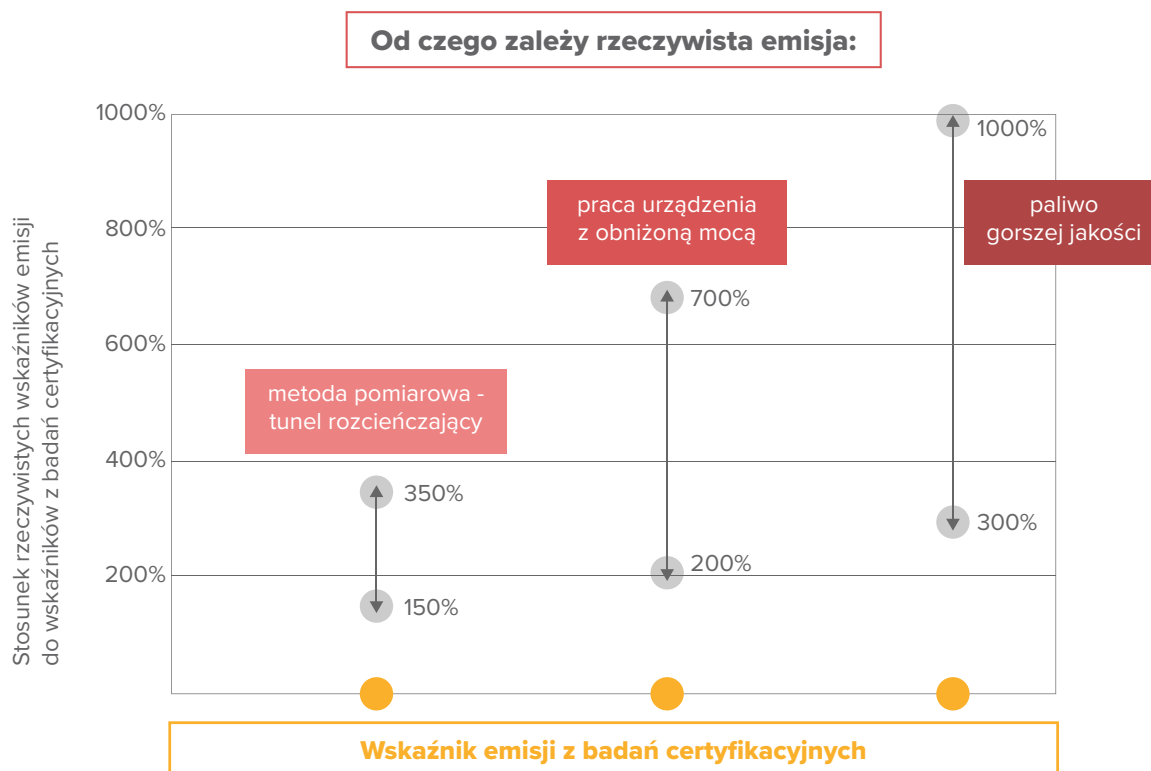
- » Kotły na pellet: 2,9 – 377 mg/MJ (stosunek wartości najwyższej do najniższej: 130)
- » Ogrzewacze na pellet: 3 – 139 mg/MJ (46)
- » Ogrzewacze na drewno: 20 – 1433 mg/MJ (72)
- » Otwarte kominki: 322 – 1610 mg/MJ (3).

Tak duża rozpiętość wyników, zwłaszcza w przypadku pierwszych trzech kategorii, związana jest z kilkoma najważniejszymi grupami czynników. Kluczową rolę odgrywa klasa emisyjna urządzenia. W badaniu Alves i in. z 2011 r. [23] porównywano wskaźniki emisji $PM_{2,5}$ ze spalania kilku rodzajów paliwa w dwóch urządzeniach: tradycyjnym kominku oraz w nowoczesnym ogrzewaczu z certyfikatem „eco-label”. W zależności od rodzaju drewna, wskaźniki dla urządzenia starego typu były od 300% do 1400% wyższe niż w urządzeniu nowoczesnym.

Powyższy przegląd wskazuje, że rzeczywiste wskaźniki emisji mogą być wielokrotnie wyższe, niż najczęściej stosowane wartości, pochodzące z podstawowych testów obejmujących jedynie pomiar w stabilnych warunkach pracy urządzenia z mocą nominalną, przy wykorzystaniu wysokiej jakości paliw, przewyższających parametrami typowe paliwa wykorzystywane w polskich gospodarstwach domowych. **Zestawienie wpływu poszczególnych parametrów na rzeczywiste wskaźniki emisyjne ilustruje poniższa grafika.**

Rysunek 5

Wskaźniki emisji z badań rzeczywistych w porównaniu do wskaźników otrzymywanych z badań certyfikacyjnych.



6 Możliwość wykorzystania rzeczywistych wskaźników emisji

Badania typu certyfikacyjnego, obligatoryjne przed wprowadzeniem urządzeń na rynek (w celu stwierdzenia dotrzymania standardów emisyjnych np. klasy 5 lub ekoprojektu), są powszechnie wykonywane przez wiele laboratoriów na całym świecie. Uzyskiwane w ten sposób wskaźniki emisyjne stanowią często podstawę systemów szacowania emisji np. w ramach inwentaryzacji krajowych. Podejście takie, choć powszechne, jest jednak obciążone dużą niepewnością, nie wspominając już o **dużym prawdopodobieństwie niedoszacowania wielkości emisji**. Stosując te wskaźniki zakłada się bowiem, że emisja związana z użytkowaniem tych urządzeń w **warunkach rzeczywistych będzie porównywalna do tej uzyskiwanej w laboratorium**.

Znacznie dokładniejsze przybliżenie w realnym szacowaniu emisji zapewnia stosowanie wskaźników emisyjnych pochodzących z badań emisji rzeczywistych, które w swych założeniach znacznie lepiej charakteryzują suboptymalne warunki pracy urządzeń przy uwzględnieniu m.in. różnej jakości paliwa. Co ważniejsze, badania takie uwzględniają także udział przemian chemicznych następujących w momencie kontaktu gazów odlotowych z powietrzem atmosferycznym, w tym przede wszystkim procesów kondensacji i tworzenia cząstek pyłu wtórnego z (organicznych i nieorganicznych) zanieczyszczeń gazowych.

Należy podkreślić, że urządzenia wykorzystywane w sieci monitoringu jakości powietrza (zarówno grawimetryczne/manualne jak i automatyczne poborniki pyłu) mierzą stężenia pyłu **w atmosferze**, a więc uwzględniają **również frakcję kondensującą pyłu**, jak i inne formy pyłu wtórnego, który powstaje w wyniku przemian fizykochemicznych zachodzących w atmosferze w obecności prekursorów pyłu. Stosowanie **wskaźników emisyjnych pochodzących z badań metodą rozgrzanego filtra** do celów inwentaryzacji emisji, a następnie uwzględnienie ich w **procesie modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń musi w efekcie prowadzić do znacznych niedoszacowań zarówno emisji jak i stężeń pyłu** zawieszonych w powietrzu atmosferycznym.

Rzeczywiste wskaźniki emisji mają kluczowe znaczenie dla skutecznego zarządzania jakością powietrza zarówno na szczeblu regionalnym, jak i lokalnym. Ich uwzględnienie w procesie inwentaryzacji źródeł emisji zanieczyszczeń powietrza może pozwolić z jednej strony na ulepszenie i urealnienie baz inwentaryzacji emisji, zaś z drugiej przyczynić się do optymalnego planowania działań zawartych w Programach Ochrony Powietrza (w oparciu o realnie oszacowane redukcje emisji) oraz zwiększenia skuteczności ograniczeń wprowadzanych przez uchwały antysmogowe, jak i wskazać kierunki opracowywanych i wdrażanych strategii ochrony powietrza na poziomie kraju.

7 Rekomendacje

Kluczowym wnioskiem z przeprowadzonych analiz jest fakt, iż rzeczywista emisja pyłu z urządzeń spalających paliwa stałe jest wyższa niż ta wynikająca z badań certyfikacyjnych.

Zatem podstawową rekomendacją jest zaktualizowanie bazy wskaźników emisyjnych wykorzystywanych do inwentaryzacji emisji, wprowadzając wskaźniki emisji uwzględniające co najmniej trzy dodatkowe zmienne:

- » moc urządzenia,
- » proces rozpalania,
- » jakość paliwa.

Wszystkie urządzenia (obecnie używane jak i planowane do wprowadzenia na rynek) powinny być **badane przy użyciu tunelu rozcieńczającego** lub innej metody **uwzględniającej frakcję kondensującą pyłu**. Jednocześnie w przypadku urządzeń najnowszej technologii, należy dążyć do zmiany **Rozporządzenia Komisji UE ws. ekoprojektu, wprowadzając jako obowiązkową metodę pomiarową uwzględniającą pomiar kondensatów**.

Drugim zestawem rekomendacji są możliwe działania, które mogą doprowadzić do realnego obniżenia rzeczywistych emisji z gospodarstw domowych. Należą do nich:

- » Jakość paliw:
 - » **przywrócenie norm jakości dla węgla**, w tym wprowadzenie sortymentu, uwzględniającego wymagania producentów kotłów **klasy 5 i ekoprojekt**,
 - » **wprowadzenie norm jakości dla pelletu**,
 - » przestrzeganie **parametrów wilgotności spalanego drewna** zgodnie z wymogami uchwał antysmogowych, a także dążenie do wprowadzenia ogólnokrajowych norm jakości dla drewna opałowego.
- » Moc urządzenia:
 - » **zainstalowanie zasobnika z wodą** (bufora ciepła), który umożliwi pracę kotła na parametrze bliskim mocy nominalnej, co jest szczególnie ważne w przypadku urządzeń z podajnikiem ręcznym,
 - » dobór **mocy urządzenia grzewczego do typowych**, a nie ekstremalnych warunków zapotrzebowania na energię w danym budynku.
- » Tryb pracy:
 - » preferowane **dotowanie wymiany starych kotłów na urządzenia automatyczne** (przede wszystkim ze względu na znacznie rzadsze fazy ich rozpalania w porównaniu z urządzeniami z załadunkiem ręcznym),
 - » korzystanie z urządzenia **zgodnie z dokumentacją techniczną**, w szczególności przy rozpalaniu.

Równolegle rekomendowana jest intensyfikacja prowadzonych szkoleń dla decydentów odpowiedzialnych za zarządzanie jakością powietrza, w szczególności z zakresu podkreślenia różnic (i ich konsekwencji) pomiędzy wskaźnikami pochodzącymi z badań certyfikacyjnych względem rzeczywistych emisji.

8 Bibliografia

- [1] Norma PN-EN 303-5:2012. Kotły grzewcze - Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW - Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie
- [2] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 1 sierpnia 2017 r. w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe (Dz. U. 2017, poz. 1690)
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1185 z dnia 24 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla miejscowych ogrzewaczy pomieszczeń na paliwo stałe
- [6] Norma PN-EN 16510-1:2023-06. Mieszkaniowe urządzenia spalające paliwo stałe - Część 1: Wymagania ogólne i metody badań
- [7] Bachmaier H. et al. (2016). BeReal: Advanced Testing Methods for Better Real Life Performance of Biomass Room Heating Appliances Final publishable summary report
- [8] Schwarz M et al. (2011). Determination of annual efficiency and emission factors of small-scale biomass boiler. Central European Biomass Conference, Österreichischer Biomasse-Verband, 2011
- [9] Branc M. et al. (2011). Fine particle emissions from combustion of wood and lignite in small furnaces. Environmental Protection Engineering, 37(2), 123-132
- [10] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz. U. 2018, poz. 1890)
- [11] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2022 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz. U. 2022, poz. 2856)
- [12] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 27 czerwca 2022 r. w sprawie odstąpienia od stosowania wymagań określonych w przepisach rozporządzenia w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz. U. 2022, poz. 1351)
- [13] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 25 sierpnia 2022 r. w sprawie odstąpienia od stosowania wymagań określonych w przepisach rozporządzenia w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2022 poz. 1786)
- [14] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 24 października 2022 r. w sprawie odstąpienia od stosowania wymagań określonych w przepisach rozporządzenia w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz. U. 2022, poz. 2186)
- [15] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 28 kwietnia 2023 r. w sprawie odstąpienia od stosowania wymagań określonych w przepisach rozporządzenia w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2023 poz. 835)
- [16] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 1 sierpnia 2023 r. w sprawie odstąpienia od stosowania wymagań określonych w przepisach rozporządzenia w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2023 poz. 1494)
- [17] Norma EN ISO 17225-2:2021-10. Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy - Część 2: Klasy peletów drzewnych
- [18] Schön C. and Hartmann H. (2018). Status of PM measurement methods and new developments. IEA Bioenergy Technical report, 2018
- [19] Simpson D. et al., (2020). How should condensables be included in PM emission inventories reported to EMEP/CLRTAP? Report of the expert workshop on condensable organics organised by MSC-W, Gothenburg, 17-19th March 2020. EMEP Technical Report MSC-W 4/2020. https://emep.int/publ/reports/2020/emep_mscw_technical_report_4_2020.pdf

- [20] USEPA (2017). Method 5G – Determination of Particulate Matter Emissions From Wood Heaters (Dilution Tunnel Sampling Location) 8-3-2017
- [21] Klausner F. et al. (2018). Emission characterization of modern wood stoves under real-life oriented operating conditions. *Atmospheric Environment*, 192, 257-266. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.024
- [22] Vicente E.D. and Alves C.A. (2018). An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmospheric Research*, 199, 159-185. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.08.027
- [23] Alves C.A. et al. (2011). Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types. *Atmospheric Research*, 101 (3), 692-700. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.04.015
- [24] Boman Ch. et al. (2011). Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves. *Energy Fuels* 2011, 25, 307–314. DOI: 10.1021/ef100774x
- [25] Tomsej T. et al. (2018). The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood in a small residential boiler on emissions of gaseous pollutants, particulate matter, PAHs and 1,3,5- triphenylbenzene, *Chemosphere*, 196, 18-24. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.127
- [26] Krpec K. et al. (2016). Impact of Boiler Type, Heat Output, and Combusted Fuel on Emission Factors for Gaseous and Particulate Pollutants. *Energy Fuels* 2016, 30, 8448–8456. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00850
- [27] Monteleone B. et al. (2015). Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions. *Applied Energy*, 155, 160-170. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.089
- [28] Chiesa M. et al. (2016). Integrated study through LCA, ELCC analysis and air quality modelling related to the adoption of high efficiency small scale pellet boilers. *Biomass and Bioenergy*, 90, 262-272. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.019
- [29] Gonçalves C. et al. (2011). Organic compounds in PM_{2.5} emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4533-4545. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.071
- [30] Horák J. et al. (2020). Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter. *Atmospheric Environment*, 229, 117437. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117437
- [31] Vicente E.D. et al. (2015). Particulate and gaseous emissions from the combustion of different biofuels in a pellet stove. *Atmospheric Environment*, 120, 15-27. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.067
- [32] Li Q. et al. (2016). Improving the Energy Efficiency of Stoves To Reduce Pollutant Emissions from Household Solid Fuel Combustion in China. *Environmental Science & Technology Letters*, 3 (10), 369-374. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00324
- [33] Lasek J. et al. (2019). Smokeless Fuel for Residential Heating as a Remedy for Air Pollution: Laboratory and Pilot-Scale Operational Investigations. *Energy & Fuel*, 33 (11), 11757-11767. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01858