

**Bolesław Karwat, Ryszard Machnik, Jerzy Niedźwiedzki, Magdalena Nogaj**

AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,  
al. Mickiewicza 30,30-059 Kraków.

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

E-mail: karwat@agh.edu.pl, machnik@agh.edu.pl, jniedz@agh.edu.pl, nogaj@agh.edu.pl

## **Dobór parametrów eksploatacyjnych elektrofiltru obniżającego niską emisję pyłów pochodzących ze spalania paliw stałych**

**Słowa kluczowe:** *ochrona powietrza, niska emisja, pyły PM10 i PM2,5, elektrofiltr, parametry eksploatacyjne*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań, mających na celu opracowanie konstrukcji, wykonanie oraz dobór parametrów eksploatacyjnych elektrofiltru do zastosowań w gospodarstwach domowych. Obiektem badań był opracowany i wykonany przez autorów prototyp elektrofiltru przeznaczony do montażu w kanale spalinowym budynku jednorodzinnego. Istotnym problemem jest dobór odpowiedniej elektrody ulotowej. Zasymulowano zapylenie powstające na skutek spalania paliw stałych. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych stężeń pyłów na wlocie do elektrofiltru, regulując podawane napięcie. Uzyskane wyniki wykazały, że przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne elektrofiltru umożliwia znaczne ograniczenie niskiej emisji pyłów PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> emitowanych w procesach spalania paliw stałych: węgla kamiennego i/lub biomasy w kotłach lub kominkach stosowanych w gospodarstwach domowych lub małych kotłowniach lokalnych.

### **1. Wstęp**

Zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym stanowi bardzo istotny problem o szerokim spektrum oddziaływania na środowisko naturalne, stan zdrowia społeczeństwa, między innymi poprzez migrację wraz z ziarnami pyłów toksycznych związków ołowiu, kadmu, niklu i arsenu. Jednym ze źródeł zanieczyszczeń powietrza są pyły pochodzące ze spalania paliw stałych, ciekłych i gazowych emitowanych do atmosfery. Inną przyczyną zanieczyszczeń powietrza są pyły powstające na skutek eksploatacji pojazdów samochodowych, spalania oleju napędowego w silnikach o zapłonie samoczynnym oraz ścierania się elementów mechanicznych np. układu hamulcowego [4, 5]. W przypadku źródeł znajdujących się na wysokości nie większej niż 40 m, źródła takie określa się mianem niskiej emisji. Niska emisja stanowi źródło wielu zanieczyszczeń powietrza, a w szczególności pyłów PM<sub>10</sub> oraz PM<sub>2,5</sub>. W składzie chemicznym pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> znajdują się groźne dla zdrowia składniki chemiczne. Są to między innymi: wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, dioksyny oraz metale ciężkie lub ich związki [20]. Problem przekroczenia norm czystości powietrza pyłem zawieszonym pochodzącym ze źródeł niskiej emisji dotyczy zarówno dużych aglomeracji miejskich jak i miejscowości mniejszych w tym uzdrowiskowych.

W miejscowościach o słabej wentylacji naturalnej, wynikającej z ukształtowania terenu lub zabudowy ograniczającej naturalne kanały przewietrzania obszaru zabudowanego, niska emisja jest główną przyczyną powstawania smogu.

Problem zanieczyszczenia powietrza jest od wielu lat przedmiotem analiz prowadzonych przez Europejską Agencję Ochrony Środowiska EEA (European Environment Agency) [8]. Raport ten wskazuje, że Polska jest nadal w czołówce krajów, które mają problem szczególnie z pyłami zawieszonymi, powstającymi głównie w wyniku spalania paliw stałych. W przypadku pyłów PM<sub>10</sub> najwięcej dni z przekroczeniami normy notuje się w Bułgarii.

Badania przeprowadzone w ramach międzynarodowego projektu Aphemcom we współpracy z Europejskim Centrum Tematycznym ds. Powietrza i Zmian Klimatu (ETC/ACC) wykazały, że skutki zachorowań w wyniku zanieczyszczenia powietrza pyłami PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> wiążą się z dodatkowymi kosztami opieki zdrowotnej w państwach członkowskich UE rzędu 31 mld € [3, 16].

Na problem zanieczyszczenia powietrza zwraca uwagę dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (CAFE) [7]. Dyrektywa ta wymusza podjęcie działań naprawczych tam, gdzie pomiary wykażą przekroczenia dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń, a w szczególności PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> oraz emisji CO<sub>2</sub>.

Znaczne przekroczenia norm stężeń pyłu zawieszonego stanowi w Polsce bardzo poważny problem. Zgodnie z raportem Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska EEA z 2017 r. ilość przedwczesnych zgonów z powodu ekspozycji na pyły PM<sub>2,5</sub> wyniosła w Polsce 41 300 przypadków [8]. W aglomeracjach miejskich oraz miejscowościach z przewagą zabudowy jednorodzinnej jednym z istotnych źródeł niskiej emisji pyłów i szkodliwych gazów jest proces spalania w domowych piecach, paleniskach lub lokalnych kotłowniach węgla o niskiej jakości. Popularnym nośnikiem energii stosowanym w gospodarstwach domowych jest także biomasa w postaci peletów lub drewna opałowego. Własności fizykochemiczne, elektryczne oraz skład ziarnowy pyłów ze spalania biomasy są silnie zróżnicowane w zależności od gatunku paliwa oraz jego wilgotności [19, 21]. Paliwa te często spalane są w kotłach o przestarzałej konstrukcji oraz znacznym stopniu wyeksploatowania. Oba te czynniki wynikają z przyczyn ekonomicznych. W ostatnich latach podjęto w Polsce działania mające na celu wymianę przestarzałych kotłów i pieców użytkowanych w gospodarstwach domowych poprzez wprowadzenie systemu dopłat do nowych urządzeń. Podejmuje się także starania umożliwienia dostępu jak największej ilości odbiorców indywidualnych do miejskich sieci ciepłowniczych, jednak wszelkie te działania mają charakter długookresowy. Obecnie prowadzone są badania nad zgazowywaniem węgla w złożu. Wykorzystanie jako nośnika energii wytworzonego tą metodą gazu pozwoli na ograniczenie emisji pyłu zawieszonego powstającego w procesie spalania węgla [14].

Jedną z metod ograniczenia emisji zanieczyszczeń powietrza, a w szczególności pyłów PM<sub>10</sub> oraz PM<sub>2,5</sub> jest wprowadzenie, prostych w eksploatacji, elektrofiltrów do zastosowań w gospodarstwach domowych oraz kotłowniach lokalnych wyposażonych w kotły energetyczne o mocy do 40 kW. Badania nad tego typu urządzeniami o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych prowadzone są zarówno przez ośrodki naukowe [9, 18] jak i firmy wytwarzające produkty komercyjne [10] (OekoSolve – Szwajcaria, RWE Aktiengesellschaft – Niemcy, Ruff-Kat GmbH Holzkirchen – Niemcy, Zumikron Rüegg – Szwajcaria). W Katedrze Systemów Wytwarzania Akademii Górniczo-Hutniczej również podjęto takie badania. Ich efektem jest opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego elektrofiltru przeznaczonego do montażu w kanale spalinowym budynku jednorodzinnej. Elektrofiltr ten ogranicza emisję zanieczyszczeń pyłowych, powstających ze spalania paliw stałych, poniżej poziomu wskazanego w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2015/1189 [6], które określa, że dla kotłów na paliwa stałe z automatycznym podawaniem paliwa emisja cząstek stałych (PM) nie może przekraczać 40 mg/m<sup>3</sup>.

## **2. Metodyka badań**

### **2.1. Własności fizykochemiczne pyłów**

Własności fizykochemiczne pyłu powstającego w wyniku procesu spalania paliw decydują o wyborze rozwiązania konstrukcyjnego oraz parametrach elektrycznych elektrofiltru [12, 13]. Badania przebiegu odpylania aerozolu gaz-pył przeprowadzono dla pyłów pochodzących ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy. Paliwa te są typowymi paliwami stałymi będącymi nośnikami energii stosowanymi do celów grzewczych w gospodarstwach domowych oraz kotłowniach lokalnych.

W ramach badań pyłów, określono ich wybrane własności fizykochemiczne, które są istotne dla przebiegu procesu elektrostatycznego odpylania spalin:

- gęstość względną (metodą piknometryczną),
- wilgotność (metodą wagową),
- zawartości części palnych - straty prażenia (metodą wagową),
- skład granulometryczny (analizatorem Mastersizer 2000 Malvern Instruments Ltd.),

- rezystywność warstwy pyłu (metodą wysokonapięciową stałoprądową),
- napięcie przebicia warstwy pyłu (metodą wysokonapięciową stałoprądową).

## 2.2. Stanowisko badawcze – elektrofiltr laboratoryjny

Badania procesu separacji ziaren pyłu prowadzono w wykonanym ze stali stopowej H17N13M2 elektrofiltrze laboratoryjnym o następujących parametrach:

- średnica komory  $\varnothing 150$  mm,
- długość czynna 1000 mm,
- elektroda ulotowa centralna – wymienne elektrody o zróżnicowanej geometrii i emisyjności,
- podajnik pyłów o zmiennej wydajności,
- układ oczyszczania elektrody zbiorczej oraz zasobnik separowanych pyłów,
- przepływ powietrza przez komorę elektrofiltru zapewnia wentylator promieniowy o regulowanej wydajności, zapewniający możliwość zmiany prędkość przepływu w komorze w zakresie od 1 do 10 m/s,
- obwody zasilania: 1-fazowe 230V, wysokiego napięcia 10÷70 kV DC, o prądzie  $I \leq 2$  mA,
- obwody kontrolno-pomiarowe oraz wykonawcze układu oczyszczania elektrody zbiorczej.

W trakcie badań dokonywano pomiarów: prędkości przepływu medium (powietrza) przez komorę elektrofiltru, napięcia zasilania elektrody ulotowej, prądu elektrofiltru, obecności pyłu na wylocie elektrofiltru (za pomocą pyłomierza triboelektrycznego) oraz jego stężenia wyznaczone metodą grawimetryczną. Widok elektrofiltru laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 1.

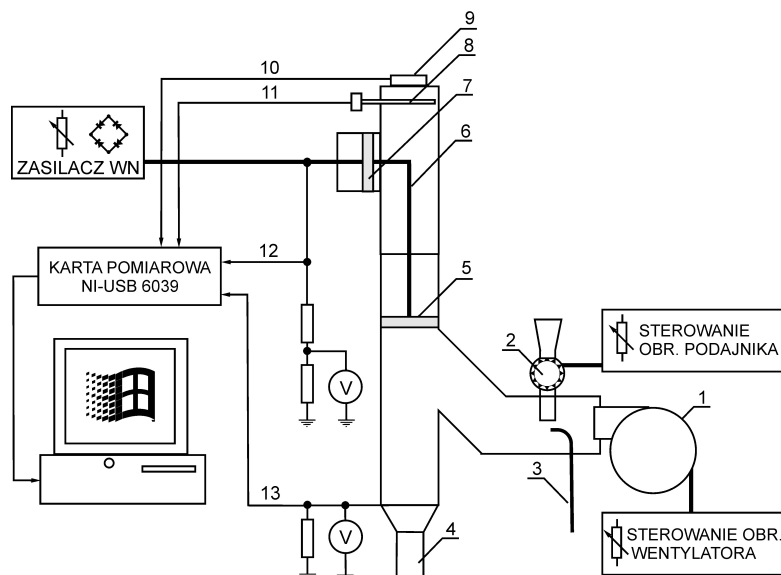


Rys. 1. Widok elektrofiltru laboratoryjnego

W górnej, pionowej części elektrofiltru zamontowano skrzynkę przyłączeniową z płytą izolacyjną oraz uchwytem do montażu badanych elektrod ulotowych. Wewnątrz komory elektrofiltru znajduje się centralnie umieszczona elektroda ulotowa (5). Na wylocie elektrofiltru umieszczono grubościenną rurę z materiału dielektrycznego, w której zamontowano sondę pyłomierza (6) oraz układ do pomiaru prędkości przepływu powietrza (7). W elektrofiltrze przewidziano także system oczyszczania komory z osadzonego na jej powierzchni pyłu, umożliwiając okresowe usunięcie pyłu z elektrody zbiorczej.

Elementy stanowiska laboratoryjnego wskazano zgodnie z oznaczeniami na rysunku 2. Przepływ powietrza przez komorę elektrofiltru zapewnia wentylator promieniowy jednofazowy (1) zasilany poprzez tyrystorowy układ regulacji napięcia dla obciążenia indukcyjnego typu TPR-2N. Zastosowanie regulatora umożliwia płynną zmianę prędkości przepływu powietrza w zakresie od 1 do 10 m/s.

W części wlotowej (zwąże) elektrofiltru zamontowano podajnik (2) pyłu o zmiennej wydajności. Zmianę ilości dozowanego w jednostce czasu pyłu zapewnia silnik krokowy, jego sterownik oraz generator sterujący o zmiennej częstotliwości. Dla niskich prędkości przepływu powietrza w elektrofiltrze przewidziano dyszę (3) do dodatkowego podawania sprężonego powietrza z kompresora. Umożliwi to lepsze tworzenie aerozolu powietrze-pył podawanego do komory elektrofiltru. Osadzony na elektrodzie zbiorczej pył, po jego strzepnięciu (regeneracji elektrody) gromadzi się w pojemniku (4).



Rys. 2. Uproszczony schemat elektrofiltru laboratoryjnego

1 – wentylator, 2 – podajnik pyłu, 3 – dysza sprężonego powietrza, 4 – zbiornik separowanego pyłu, 5 – dolne mocowanie elektrody, 6 – elektroda ulotowa, 7 – górne mocowanie elektrody 8 – czujnik pyłomierza, 9 – czujnik prędkości przepływu powietrza, 10 – tor pomiaru przepływu powietrza, 11 – tor pomiaru stężenia pyłu, 12 – pomiar wysokiego napięcia, 13 – pomiar prądu elektrofiltru.

Obwody elektryczne stanowiska stanowią: zasilacz wysokiego napięcia elektrody ulotowej, obwody pomiaru wysokiego napięcia (11) oraz prądu elektrofiltru (12). Prędkość przepływu powietrza przez komorę elektrofiltru jest mierzona on-line turbinką pomiarową (7) z czujnikiem Halla. Obecność pyłu na wyjściu elektrofiltru jest rejestrowana za pomocą pyłomierza triboelektrycznego. Sygnały napięciowe z obwodów pomiaru napięcia zasilania elektrody ulotowej, prądu płynącego pomiędzy elektrodami zbiorczymi, a masą obwodu oraz sygnał z wyjścia pyłomierza podawano na wejścia analogowe karty pomiarowej NI-USB 6039. Karta ta współpracowała z komputerem wyposażonym w oprogramowanie do rejestracji danych. Karta pomiarowa pracująca z częstotliwością próbkowania 1 kHz rejestrowała uśrednioną wartość mierzonych napięć. Program do akwizycji danych pełni funkcję wirtualnego rejestratora XY, który umożliwia wizualizację rejestrowanych danych w trybie on-line. Dane zapisywano w postaci plików ASCII w celu dalszej ich analizy.

### 2.3. Dobór parametrów elektrycznych elektrody ulotowej

Elektrofiltr rurowy do zastosowań domowych posiada tylko jedną elektrodę ulotową, usytuowaną centralnie w komorze. Dobór parametrów elektrycznych tej elektrody ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesu odpylania spalin.

Podstawowym kryterium doboru elektrody ulotowej elektrofiltru jest uzyskanie takich warunków, aby wprowadzone do komory elektrofiltru ziarna pyłu uzyskały ładunek elektryczny wystarczający do ich migracji i osadzenia na elektrodzie zbiorczej [2, 11]. Główną rolę odgrywają tu procesy przekazywania ładunku ziarnom pyłu od jonów gazowych, których źródłem są zjawiska zachodzące w bezpośrednim otoczeniu elektrody ulotowej, a ściślej od punktów na jej powierzchni, z których rozwijają się lawiny elektronowe. Proces gromadzenia ładunku przez ziarna pyłu w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltru polega na przyjmowaniu przez nie ładunku elektrycznego. Obdarzone ładunkiem ziarna pyłów poruszają się głównie w kierunku elektrod zbiorczych. Zdecydowana większość cząstek zanieczyszczeń pyłowych jest ładowana ujemnie i osadza się na uziemionych elektrodach zbiorczych o potencjale dodatnim [15], przy czym duży wpływ na własności osadzonej na elektrodzie zbiorczej warstwy pyłu ma jego rezystywność [1].

Doboru typu i cech geometrycznych elektrody ulotowej elektrofiltru do zastosowań w gospodarstwach domowych dokonano na podstawie wyznaczonych charakterystyk prądowo-napięciowych wybranych elektrod ulotowych oraz napięcia początkowego ulotu.

Charakterystykę prądowo-napięciową  $I-U$  uzyskuje się rejestrując zmianę prądu płynącego w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltru w funkcji napięcia zasilającego elektrodę ulotową. Pomiary prowadzono zmieniając napięcie zasilania elektrody ulotowej w zakresie  $U=0\div 30$  kV. Elektroda zbiorcza połączona jest z dodatnim biegunem układu zasilania poprzez rezystor dekadowy o tolerancji wykonania rezystorów 0,05%. Rejestrowanie wartości napięcia zasilania elektrody ulotowej oraz prądu płynącego w przestrzeni międzyelektrodowej, proporcjonalnego do spadku napięcia na rezystorze dekadowym, umożliwia wyznaczenie charakterystyki  $I-U$ . Sygnały napięciowe z obwodów pomiaru napięcia zasilania elektrody ulotowej oraz prądu płynącego pomiędzy elektrodą zbiorczą a masą obwodu są podawane na wejścia analogowe karty pomiarowej NI-USB 6039, połączonej z komputerem wyposażonym w oprogramowanie do rejestracji danych. Dla każdego z punktów pomiarowych, mierzonych z krokiem  $\Delta U=500$  V, rejestrowano uśrednioną wartość mierzonych napięć. Zarejestrowane dane zapisywano w plikach w celu poddania ich dalszej analizie.

Początkowe napięcia ulotu elektrod wyznaczano z funkcji liniowej  $U/I=f(U)$  (tzw. charakterystyki zredukowanej). Charakterystyka prądowo-napięciowa elektrody ulotowej oraz napięcie początkowe ulotu świadczą o emisyjności elektrody, a więc zdolności wytworzenia pola elektrostatycznego, w którym ziarna pyłu uzyskują ładunek elektryczny.

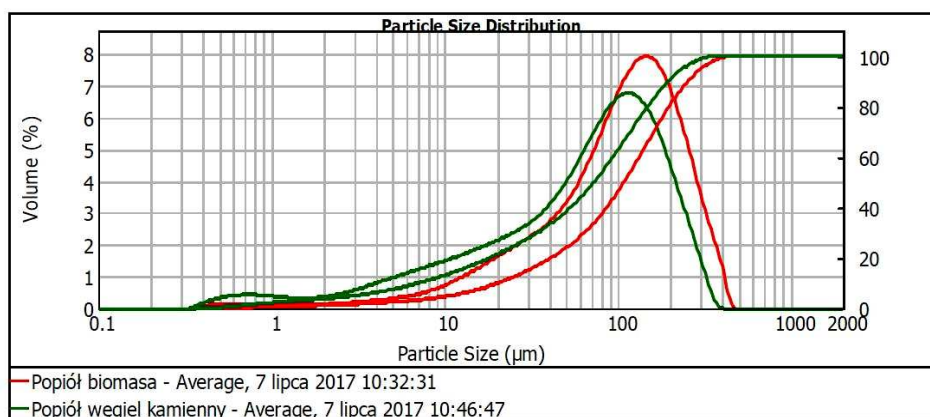
### 3. Wyniki badań

Wybrane własności fizykochemiczne mające istotny wpływ na przebieg procesu elektrostatycznej separacji pyłów ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Własności fizykochemiczne pyłów ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy

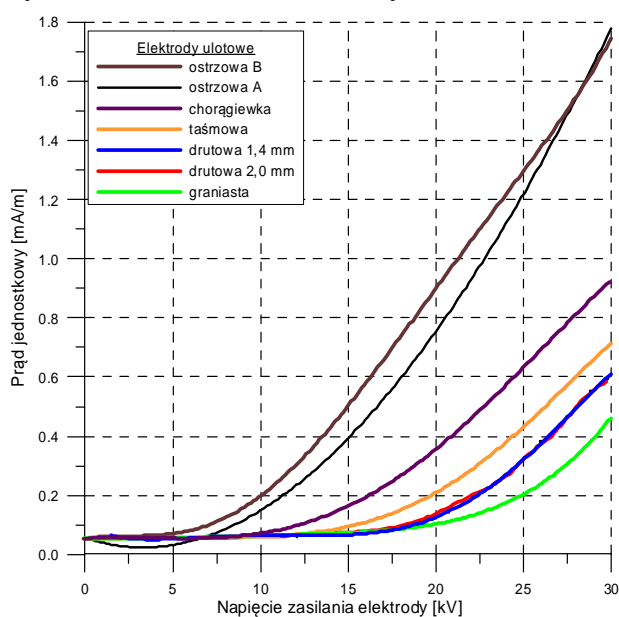
Własność fizykochemiczna	Jednostka	Pył ze spalania		
		węgla kamiennego	biomasy	
Gęstość względna	kg/m <sup>3</sup>	1902,0	2400,0	
Zawartość wody	% wag.	0,42	1,15	
Zawartość części palnych	% wag.	5,933	3,31	
Rezystywność warstwy pyłu	30°C	Ω/cm	$1,4 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^{10}$
	150°C	Ω/cm	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$
Napięcie przebicia warstwy pyłu	kV/mm	0,995	0,976	

Zbiorcze zestawienie wyników analizy składu granulometrycznego wykonane analizatorem Mastersizer 2000 przedstawiono na rysunku 3. Wyniki tych analiz wskazują, że zawartość w pyłach frakcji ziaren PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> nie przekracza 20% obj.



Rys. 3. Skład granulometryczny pyłów ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy

Doboru elektrody ulotowej elektrofiltru dokonano na podstawie analizy charakterystyk prądowo-napięciowych oraz wartości początkowych napięć ulotu elektrod, które wytypowano do badań. Przyjęto założenie, że elektroda ulotowa elektrofiltru rurowego do zastosowań domowych powinna się charakteryzować wysoką emisyjnością, możliwie niskim początkowym napięciem ulotu oraz wysoką trwałością mechaniczną. Z tego względu zrezygnowano z zastosowania w elektrofiltrze elektrody drutowej stosowanej w niektórych rozwiązaniach [17]. Na etapie doboru elektrody ulotowej uznano, że korzystnym rozwiązaniem konstrukcyjnym będą elektrody typu masztowego. Ze względu na ich sztywność mogą one być z powodzeniem montowane w elektrofiltrze poprzez mocowanie jednopunktowe od góry, które upraszcza konstrukcję elektrofiltru i eliminuje możliwość zwarcia poprzez przewodzące mostki pyłu, który mogłyby osadzać się na dolnym elemencie montażowym elektrody ulotowej. Wyniki pomiarów emisyjności wytypowanych do badań elektrod ulotowych zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 4. Zbiornicze charakterystyki prądowo-napięciowe elektrod ulotowych

prostoty rozwiązania konstrukcyjnego, minimalizacji kosztów budowy i eksploatacji elektrofiltru. Określając skuteczności separacji pyłów przez elektrofiltr przyjęto, że stężenie pyłów na wylocie elektrofiltru nie powinno przekraczać  $40 \text{ mg/m}^3$ , co wynika z Rozporządzenia Komisji (UE) 2015/1189 [6].

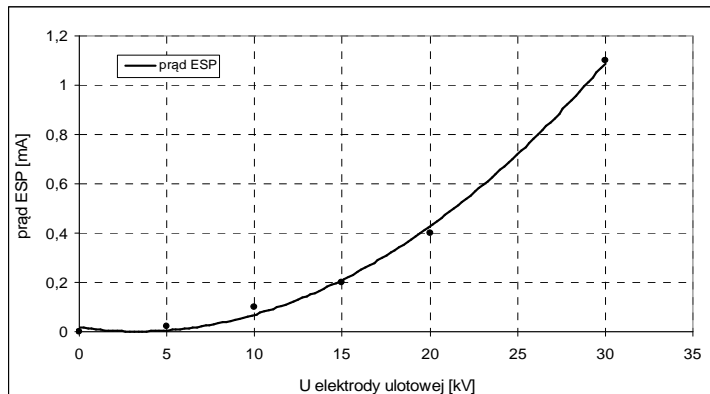
Biorąc pod uwagę różnorodność eksploatowanych w gospodarstwach domowych kotłów energetycznych, ich stan techniczny, a także parametry paliw w nich spalanych, nie ma możliwości jednoznacznego określenia własności jakościowych (własności fizykochemicznych pyłu) i ilościowych (prędkości przepływu, stężeń pyłu na wylocie kotła) oczyszczanych spalin. W tej sytuacji należy przyjąć najbardziej niekorzystne parametry odpylania. Z tego względu do komory elektrofiltru podawano aerozol pyłu w takiej ilości, aby uzyskać, dla prędkości przepływu medium  $1 \text{ m/s}$  oraz  $1,5 \text{ m/s}$ , jego stężenie na wlocie elektrofiltru:

- $2000 \text{ mg/m}^3$  powietrza,
- $4000 \text{ mg/m}^3$  powietrza,

Oznacza to, że podczas badań skuteczności separacji pyłu przez elektrofiltr stężenia podawanego pyłu były większe 7 do 12 razy w stosunku do stężeń pyłu wynikających z obliczeń dla przyjętej mocy cieplnej kotła oraz wartości opałowych paliw. Także przyjęta prędkość przepływu medium przez komorę elektrofiltru była ok. 2 razy wyższa od wyznaczonej metodą obliczeniową. Dla badanych pyłów ze spalania węgla oraz biomasy dokonano serii pomiarów zmieniając prędkość przepływu powietrza w komorze elektrofiltru, stężenie pyłu oraz napięcie zasilania elektrody ulotowej.

Po przeprowadzeniu badań parametrów elektrycznych elektrod ulotowych, uznano, że należy zmodyfikować konstrukcję elektrody masztowej typu ostrzowego, tak by uzyskać lepsze parametry elektryczne. Pomiar potwierdził prawidłowość tego rozwiązania. Elektroda masztowa typu A charakteryzuje się bardzo wysoką emisyjnością oraz, co bardzo istotne, niskim początkowym napięciem ulotu  $U_0=5,7 \text{ kV}$ . Podejmując badania parametrów pracy elektrofiltru, dokonano wstępnych założeń odnośnie procesu odpylania spalin powstających ze spalania paliw stałych (węgla kamiennego oraz biomasy) w kominkach lub kotłach c.o. Założenia te dotyczyły m.in.: mocy stosowanego kotła, własności oraz sortymentów paliw stałych, skuteczności separacji pyłów przez elektrofiltr,

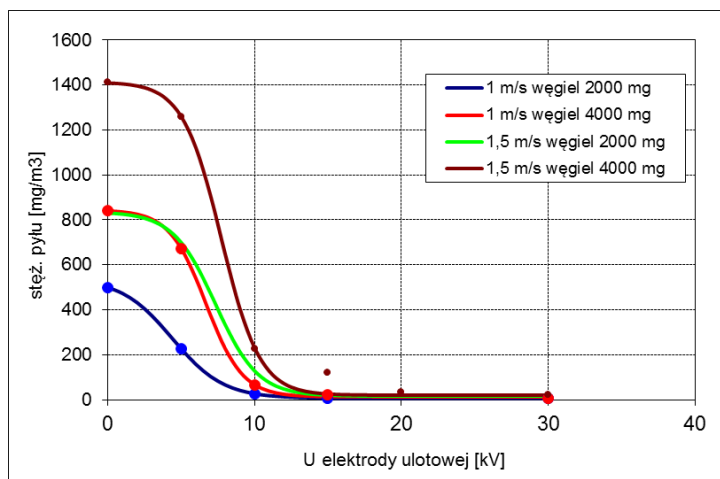
W trakcie badań procesu odpylania wyznaczono zmianę prądu pracy elektrofiltru w funkcji napięcia zasilającego dla wybranych stężeń pyłu przy zadanych prędkościach przepływu aerozolu gaz-pył przez jego komorę. Zależność wartości prądu płynącego w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltru od napięcia zasilania elektrody ulotowej przedstawiono na rysunku 5.



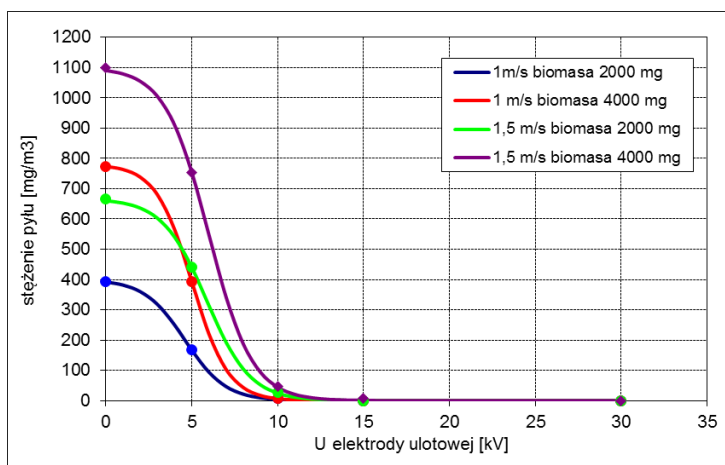
Rys. 5. Zależność natężenia prądu elektrofiltru od napięcia zasilania elektrody ulotowej

Wyniki pomiarów prądu w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltru wykazały niewielki wpływ stężeń pyłów oraz prędkości przepływu medium na wartości prądu. Zmiany prądu w całym zakresie zmian stężeń pyłu i prędkości medium nie przekroczyły 10%. Oznacza to, że prąd elektrofiltru głównie zależy od jego geometrii, napięcia zasilania elektrody ulotowej oraz wydajności prądowej zasilacza wysokiego napięcia.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono zmianę stężenia pyłów na wylocie elektrofiltru w funkcji napięcia zasilającego elektrodę ulotową. Wyniki uzyskane dla pyłów ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Zależność stężenia pyłu na wylocie elektrofiltru od napięcia zasilania elektrody ulotowej dla pyłu ze spalania węgla



Rys. 7. Zależność stężenia pyłu na wylocie elektrofiltru od napięcia zasilania elektrody ulotowej dla pyłu ze spalania biomasy

Bardzo istotnym parametrem eksploatacyjnym elektrofiltru jest skuteczność odpylania. Uzyskanie wysokiej skuteczności elektrofiltru świadczy o prawidłowym doborze jego cech geometrycznych dobranych na etapie projektowania urządzenia. Istotny wpływ na uzyskiwaną skuteczność ma prawidłowy dobór geometrii, a więc parametrów elektrycznych elektrody ulotowej. Znaczenie ma również dobór zasilacza wysokiego napięcia w tym jego napięcie wyjściowych i wydajności prądowej. Wyniki pomiarów skuteczności odpylania pyłu ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy dla wybranych wartości napięcia zasilania elektrody ulotowej elektrofiltru dla pyłów ze spalania węgla kamiennego dla prędkości przepływu medium  $v = 1 \text{ m/s}$  oraz  $v = 1,5 \text{ m/s}$  zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skuteczność odpylania pyłu ze spalania węgla dla wybranych napięć zasilania ESP

Pyły ze spalania węgla kamiennego				
Napięcie pracy ESP [kV]	Prędkość przepływu medium <b>1 m/s</b>			
	Stężenie pyłu na <b>wlocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>2000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]	Stężenie pyłu na <b>wlocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>4000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]
	Stężenie pyłu na <b>wylocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ]		Stężenie pyłu na <b>wylocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ]	
0	500,0	0,0	840,0	0
5	226,7	54,7	673,3	19,8
10	26,7	94,7	66,7	92,1
15	6,7	98,7	20,0	97,6
30	6,7	98,7	6,7	99,2
Napięcie pracy ESP [kV]	Prędkość przepływu medium <b>1,5 m/s</b>			
	Stężenie pyłu na <b>wlocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>2000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]	Stężenie pyłu na <b>wlocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>4000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]
	Stężenie pyłu na <b>wylocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ]		Stężenie pyłu na <b>wylocie</b> ESP [mg/m <sup>3</sup> ]	
0	830,0	0,0	1413,3	0,0
5	700,0	15,7	1260,0	10,8
10	126,7	84,7	226,7	84,0
15	40,0	95,2	120,0	91,5
20	6,7	99,0	33,3	97,6
30	6,7	99,2	20,0	98,6

Analiza wyników zestawionych w tabeli 2 wskazuje na wysoką skuteczność odpylania. Przyjmując najbardziej niekorzystne warunki pracy elektrofiltru tj. wysokie prędkości przepływu spalin oraz wysokie stężenia pyłu na wylocie kotła, napięcie elektrody ulotowej (dla



komory o średnicy  $\varnothing 150$  mm) powinny wynosić ok. 20 kV. Dla tego napięcia, prąd pracy elektrofiltru  $I$  nie przekroczy wartości 0,5 mA.

Wyniki analogicznych pomiarów skuteczności elektrofiltru dla pyłów ze spalania biomasy przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skuteczność odpylania pyłu ze spalania biomasy dla wybranych napięć zasilania ESP

Pyły ze spalania biomasy				
Napięcie pracy ESP [kV]	Prędkość przepływu medium 1 m/s			
	Stężenie pyłu na wlocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>2000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]	Stężenie pyłu na wlocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>4000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]
0	393,3	0,0	773,3	0,0
5	166,7	57,6	393,5	49,1
10	6,7	98,3	6,7	99,1
15	6,7	98,3	6,7	99,1
30	3,3	99,2	6,7	99,1
Napięcie pracy ESP [kV]	Prędkość przepływu medium 1,5 m/s			
	Stężenie pyłu na wlocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>2000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]	Stężenie pyłu na wlocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ] <b>4000 mg</b>	Skuteczność odpylania [%]
Stężenie pyłu na wylocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ]	Stężenie pyłu na wylocie ESP [mg/m <sup>3</sup> ]			
0	666,7	0	1100,0	0,0
5	440,0	34	753,3	31,5
10	26,7	96	46,7	95,8
15	3,3	99,5	6,7	99,4
30	3,3	99,5	3,3	99,7

Analiza wyników wskazuje, że w przypadku pyłów ze spalania biomasy przy napięciu zasilania elektrody ulotowej  $U \geq 15$  kV stężenie pyłu zawieszonyego na wylocie elektrofiltru jest niższe od poziomu stężeń wynikających z Rozporządzenia Komisji UE (40 mg/m<sup>3</sup>). Uzyskane wyniki pomiarów wykazały skuteczność separacji w elektrofiltrze pyłów zarówno ze spalania węgla kamiennego jak i biomasy, mimo że pyły te mają odmienne własności fizykochemiczne oraz elektryczne.

#### 4. Podsumowanie

Badania oraz analiza wyników pomiarów miały na celu opracowanie koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego elektrofiltru, dobór jego parametrów geometrycznych, elektrycznych oraz procesowych. Powyższy cel został zrealizowany, na co wskazują uzyskane wyniki pomiarów. Umożliwiły one określenie parametrów eksploatacyjnych elektrofiltru zapewniają-

cych prawidłowy przebieg procesu separacji pyłów pochodzących ze spalania paliw stałych stosowanych w gospodarstwach domowych.

Rezultaty badań weryfikacyjnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym z użyciem pyłów ze spalania węgla kamiennego oraz biomasy wykazały, że elektrofiltr separuje pyły zgodnie z przyjętymi założeniami. Potwierdzono to przeprowadzając próby odpylania aerozoli gaz-pył o stężeniach pyłu ponad 12-krotnie przekraczających stężenia wynikające z eksploatacji kotła energetycznego w warunkach domowych. W próbach tych wprowadzano do elektrofiltru pyły w takiej ilości, by ich stężenie na jego wlocie wynosiło do  $4000 \text{ mg/m}^3$ . Przy napięciu zasilania  $U = 20 \text{ kV}$ , skuteczność odpylania elektrofiltru wynosiła 97,6%. Oznacza to, że w warunkach eksploatacji (przy parametrach podobnych, jak w przypadku pyłów wzorcowych z paliwa węglowego jak i biomasy) powinien nastąpić spadek zapylenia z poziomu  $300 \text{ mg/m}^3$  do wartości nieprzekraczającej  $10 \text{ mg/m}^3$ . Tak, więc uzyskane wyniki wskazują na słuszność przedstawionej koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego elektrofiltru.

Walidacja rozwiązania konstrukcyjnego elektrofiltru dla potrzeb domowych wymagała badań elektrofiltru w warunkach rzeczywistych. Z tego względu wykonano prototyp elektrofiltru, o średnicy komory  $\varnothing 180 \text{ mm}$ , dla potrzeb gospodarstw domowych. Został on zainstalowany w kanale kominowym budynku ogrzewanego kotłem energetycznym DEFRO Optima Komfort 15STD o mocy 15 kW opalany węglem kamiennym lub drewnem. Elektrofiltr ten został wyposażony w system oczyszczania elektrod z osadzonego na nich pyłu. Zapewnia to prawidłowy przebieg procesu odpylania spalin. Elektrofiltr jest zasilany z sieci elektrycznej jednofazowej 230 V. W skład obwodów zasilania wchodzi: zasilacz wysokiego napięcia 30 kV DC, sterownik mikroprocesorowy nadzorujący pracę elektrofiltru m.in. temperaturę załączenia przekraczającą temperaturę punktu rosy w komorze elektrofiltru, interwał czasowy oczyszczania elektrod z osadzonego pyłu, stan pracy urządzenia itp. Szacowany pobór mocy przy obciążeniu nominalnym nie przekracza 30 W.

Przedstawiona koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego, po przeprowadzeniu dalszych badań eksploatacyjnych, umożliwi podjęcie produkcji elektrofiltrów dostosowanych do indywidualnych potrzeb odbiorców.

## Bibliografia

1. Barranco R., Gong M., Thompson A., Michael Cloke M., Hanson S., Will Gibb W. Lester E. The impact of fly ash resistivity and carbon content on electrostatic precipitator performance. *Fuel* 86, 2007; 2521–2527.
2. Böttner C. U. The role of the space charge density in particulate processes in the example of the electrostatic precipitator. *Powder Technology*, v 135–136, 2003; 285–294.
3. Chanem O., Perez L., Knuli N., Medina S. The hidden economic burden of air pollution-related morbidity: evidence from the Aphekom project. *Eur. J. Health Econ.* 2016; 17: 1101. doi:10.1007/s10198-015-0748-z.
4. Chłopek Z. Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (2): 160–170.
5. Chłopek Z., Jakubowski A. The examination of the reduction of particulate matter emission from motor vehicle braking systems. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 4 (48): 29–36.
6. Commission Regulation (EU) 2015/1189 of 28 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers, *J L* 193, 2015; 100–114.
7. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *OJ L* 152, 2008; 1–44.

8. European Environment Agency. Air quality in Europe 2017 report, EEA Report No 13/2017 Publications Office of the European Union Luxembourg 2017; ISBN 978-92-9213-920-9 doi:10.2800/358908.
9. Fischer, T., Grass N., Zouzou N., Dăscălescu L., Greil R., Hopf N. Smart home precipitator for biomass-furnaces: Design considerations on a small scale electrostatic precipitator. Annual Meeting. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 50, 2014; 3: 2219-2224
10. Hartmann H., Turowski P., Kiener S. Electrostatic procipitators for small-scale wodo combustion systems – Results from lab-and field tests. Central Europe Biomass Conference (CEBC), 26.-28. January 2011 Graz. IEA Task32-Workshop: „Fine particulate emissions from small-scale biomass furnaces”.
11. Jędrusik M., Świerczok A. The correlation between corona current distribution and collection of fine particles in a laboratory-scale electrostatic precipitator. Journal of Electrostatics, v. 71, 2013; 3: 199–203
12. Machnik R., Karwat B., Nocuń M., Niedźwiedzki J. Wpływ fizykochemicznych właściwości popiołów lotnych ze spalania węgla na proces elektrostatycznego odpylania spalin. Przemysł Chemiczny 2015; 94(9): 1530–1533.
13. Machnik R., Nocuń M. Effect of anti-corrosion coatings of corona electrodes on selected operating parameters of industrial electrostatic precipitators. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 16(1): 56–60.
14. Mocek P, Zamiar R, Jachimczyk R, Gowarzewski R, Świądrowski J, Gil I, Stańczyk K. Selected issues of operating 3 MW underground coal gasification installation. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2015; 17 (3): 427–434.
15. Parker K. Electrical operation of electrostatic precipitators. London, The Institution of Electrical Engineers 2003.
16. Pascal M, Medina S. Résumé des résultats du projet Aphekom 2008-2011. Des clefs pour mieux comprendre les impacts de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Europe. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2012; 6 p. Disponible à partir de l’URL: <http://www.invs.sante.fr>.
17. Popa G. N., Dăscălescu L. Variable Cross-Section Cylinder-Type Corona and Combined Corona–Dielectric Barrier Discharge Precipitators for Fly-Ash Particles. Particulate Science and Technology: An International Journal, Taylor & Francis 2014; 445-450, DOI: 10.1080/02726351.2013.878773.
18. Ruttanachot Ch., Tirawanichakul Y., Tekasakul P. Application of electrostatic precipitator in collection of smoke aerosol particles from wood combustion. Aerosol Air Qual. Res. 11, 2011; 90-98.
19. Vicente E. D., Alves C. A. An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. Atmospheric Research 199, 2018; 159–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.027>.
20. Wiinikka, H., Grönberg, C., Boman, C., Emissions of heavy metals during fixed-bed combustion of six biomass fuels. Energy Fuel 27, 2013; 1073-1080. <http://dx.doi.org/10.1021/ef3011146>.
21. Zhang, Y., Obrist, D., Zielinska, B., Gertler, A., 2013. Particulate emissions from different types of biomass burning. Atmos. Environ. 72, 27-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.026>.