

Elektrofiltry odpylające spaliny z kotłów rusztowych

Dobór konstrukcji elektrody ulotowej

Maria Jędrusik

Politechnika Wrocławska

Arkadiusz Świerczok

Politechnika Wrocławska

Kotły rusztowe wyposażano dotychczas w odpylacze mechaniczne, rzadko w elektrofiltry lub filtry tkaninowe. Zaostrzenie przepisów dotyczących emisji pyłów do atmosfery (Dyrektywa IED) oraz spodziewane ograniczenie emisji cząstek submikronowych PM-10 oraz PM-2,5 wymagać będą stosowania wysokosprawnych odpylaczy również za kotłami rusztowymi.

Wzrost skuteczności odpylania odpylaczy mechanicznych (cyklonów i multicyklonów) wymaga zwiększenia prędkości przepływu gazu przez odpylacz, co zwiększa stratę ciśnienia oraz skraca jego żywotność. W ostatnich latach zaczęto stosować filtry tkaninowe lub kombinacje filtrów tkaninowych i cyklonów. Jednakże ich zastosowanie do odpylania spalin z kotłów rusztowych wymaga często znacznych nakładów finansowych ze względu na konieczność stosowania kosztownych tkanin filtracyjnych.

W tej sytuacji rozwiązaniem alternatywnym mogą być elektrofiltry, które są urządzeniami konkurencyjnymi pod względem nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz spełniają wymagania ochrony środowiska. Projektowa wartość skuteczności odpylania jest zazwyczaj wynikiem kompromisu pomiędzy możliwościami technicznymi, wymaganiami norm emisji oraz kosztami przyjętego rozwiązania. Osiągnięcie w elektrofiltrach pracujących za kotłami rusztowymi skuteczności, spełniających standardy emisji na poziomie $30 \text{ mg}/\text{um}^3$ lub mniej ($10 \text{ mg}/\text{um}^3$), jest możliwe.

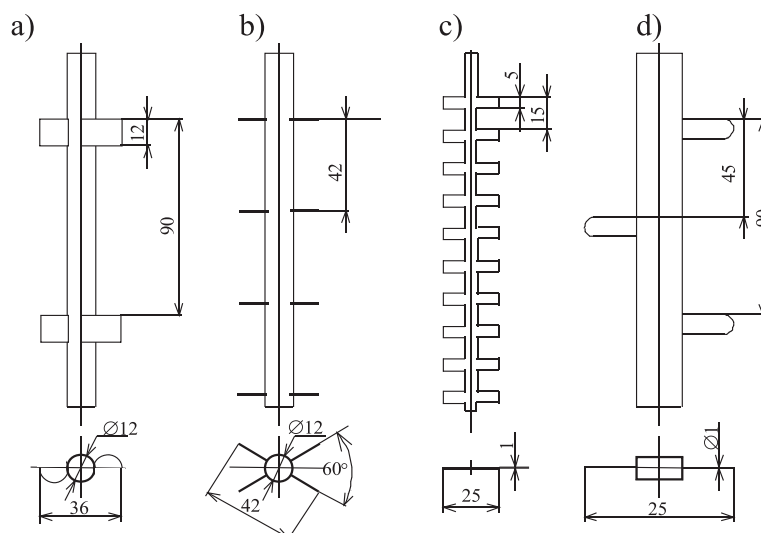
Konstrukcja elektrody ulotowej i jej wpływ na skuteczność odpylania elektrofiltru

W końcu lat 90. XX w. prowadzono liczne badania laboratoryjne konstrukcji elektrod oraz modelowano numerycznie zjawiska zachodzące w polu wyładowania ulotowego dla różnych kształtów ostrzy (Brocilo *et al.*, 2001; Caron i Dascalescu, 2004; Hsunling *et al.*, 1994; Mc Cain,

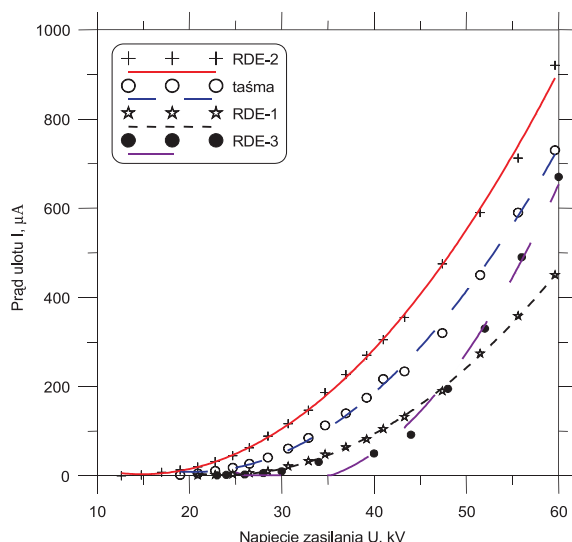
2001). Celem tych prac było znalezienie odpowiedniej podziałki międzyelektrodowej, kształtu elektrody ulotowej oraz parametrów zasilania elektrycznego w celu zapewnienia wymaganej skuteczności odpylania elektrofiltru.

Nie zmienia to faktu, że nie ma jednoznacznych wskazówek co do zastosowania dostępnych konstrukcji elektrod ulotowych. Często elektrofiltry wyposaża się w ten sam rodzaj elektrody ulotowej, bez zwracania uwagi na podziałkę międzyelektrodową czy własności ośrodka pyłowo-gazowego. Dotychczasowe doświadczenia z obiektów przemysłowych oraz badania własne wskazują, że dobór konstrukcji elektrod ulotowych do danego

Rys. 1. Proponowane konstrukcje elektrod ulotowych: a) RDE-1, b) RDE-2, c) taśma, d) RDE-3



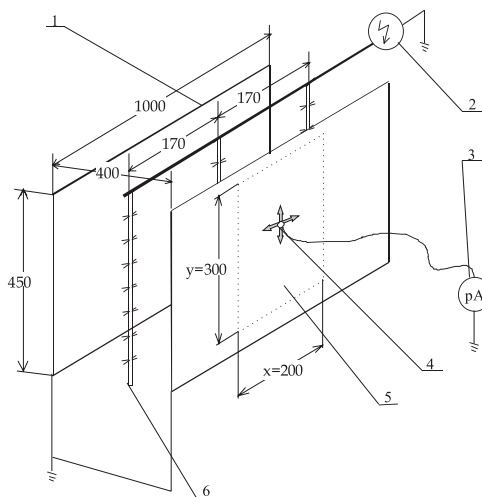
Rys. 2. Charakterystyki prądowo-napięciowe elektrod ulotowych



procesu technologicznego (uwzględniający właściwości fizykochemiczne popiołu) jest czynnikiem w istotny sposób wpływającym na skuteczność odpylania elektrofiltru.

Popioły lotne z kotłów rusztowych charakteryzują się znacznym udziałem niespalonego węgla (8-25%). Z danych literaturowych wynika, że jego wzrost niekiedy pogarsza skuteczność odpylania elektrofiltru. Pierwsze informacje na ten temat pojawiły się w latach 70. XX wieku. W pracy (Hagemann i Abland, 1973) autorzy przedstawili wyniki badań doświadczalnych wskazujących, że udział niespalonego węgla w popiele do 15% wpływa na wzrost skuteczności odpylania elektrofiltru, natomiast powyżej 20% skuteczność odpylania spada.

Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru rozkładu prądu ulotu na powierzchni elektrody zbiorczej: 1 – elektrody zbiorcze, 2 – układ zasilania wysokim napięciem, 3 – piko-amperomierz, 4 – ruchoma sonda pomiarowa, 5 – pole pomiarowe, 6 – elektrody ulotowe



Szczególnie jest to widoczne dla cząstek o średnicach $d > 106 \mu\text{m}$, w których zawartość niespalonego C jest 10-krotnie większa niż we frakcjach $d < 38 \mu\text{m}$. Wzrost udziału niespalonego C wpływa na rezystywność popiołu i zwykle powoduje obniżenie jej wartości poniżej $109 \Omega\text{cm}$ (Clocke et al., 2007).

Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych elektrod ulotowych

Rodzaj elektrod ulotowych wpływa na intensywność odpylania poprzez zmienną wartość prądu ulotu. Dla tej samej konfiguracji geometrycznej odpylacza i tego samego napięcia zasilającego, w zależności od konstrukcji elektrody ulotowej, uzyskuje się różne wartości prądu ulotu, przy czym podwyższanie jego wartości ograniczone jest napięciem przebicia przestrzeni międzyelektrodowej.

Charakterystyka prądowo-napięciowa (I-U) podaje związek pomiędzy przyłożonym napięciem zasilania i prądem ulotu dla danej konfiguracji geometrycznej elektrod.

W zależności od wartości rezystywności popiołu lotnego, wymagania odnośnie przebiegu charakterystyk prądowo-napięciowych są różne, można przy tym wyróżnić następujące przypadki (Crynack, 1991, Grieco, 1994, Jędrusik, 2008):

- pyły niskorezystywne (rezystywność poniżej $1010 \Omega\text{cm}$), które wymagają elektrod generujących wysokie prądy ulotu o dużej równomierności gęstości prądu na elektrodzie zbiorczej i duże napięcie (równoznaczne z dużym natężeniem pola elektrycznego),
- pyły o umiarkowanej rezystywności (około $1010 - 1011 \Omega\text{cm}$), dla których wskazane jest zastosowanie elektrod dających średnie poziomy prądu ulotu przy dużych wartościach napięcia wtórnego,
- pyły wysokorezystywne (powyżej $1011 - 1013 \Omega\text{cm}$) – w tym przypadku elektrody ulotowe powinny zapewniać umiarkowany, równomierny rozkład prądu ulotu na długości elektrody oraz dużą wartość napięcia wtórnego.

Z powyższego wynika, że praktycznie nie jest możliwe skonstruowanie „uniwersalnej” elektrody ulotowej, aczkolwiek niewątpliwie wskazane jest stosowanie wysokich wartości napięcia, co polepsza zarówno ładowanie, jak i wytrącanie cząstek ze strumienia gazu.

Biorąc pod uwagę wyniki prac badawczych (Jędrusik et al., 2003, Jędrusik i Świerczok, 2006, Jędrusik i Świerczok, 2009) zaproponowano cztery konstrukcje elektrod ulotowych, w tym trzy elektrody tzw. sztywne (rys. 1), których charakterystyki prądowo-napięciowe pokazano na rys. 2.

Na podstawie charakterystyk I-U zaproponowane konstrukcje elektrod ulotowych można scharakteryzować następująco:

- wysokonapięciowe i wysokoprądowe (charakterystyka „agresywna”): RDE-2, taśma, (RDE-3),
- wysokonapięciowe i średnioprądowe (charakterystyka „łagodna”): RDE-1.

Ze względu na znaczną zawartość niespalonego węgla popioły lotne z kotłów rusztowych są pyłami niskorezystywnymi (poniżej $1010 \Omega\text{cm}$), które łatwo oddają ładunek na elektrodzie zbiorczej, a to często powoduje ich ponowne porywanie. Tak więc w tym przypadku zasadniczym zadaniem elektrody ulotowej jest wytworzenie wysokiej gęstości prądu ulotu o równomiernym rozkładzie i zapewnienie wysokich wartości natężenia pola elektrycznego. Wiąże się to z zastosowaniem elektrod ulotowych o charakterystyce „agresywnej” (RDE-2, RDE-3), co nie zawsze pozwala zapewnić równomierny rozkład prądu.

Wyniki badań rozkładu prądu na elektrodzie zbiorczej

Pomiary rozkładu prądu ulotu dla wybranych elektrod ulotowych wykonano na stanowisku laboratoryjnym (rys. 3), wykorzystującym ruchomą sondę pomiarową.

Przykładowe wyniki pomiarów rozkładu prądu ulotu zamieszczono na rys. 4.

Wyniki wskazują, że konstrukcja elektrody RDE-2 cechuje się wysokim pokryciem powierzchni elektrody zbiorczej prądem, równomiernością rozkładu prądu i zapewnia wysoką wartość średnią prądu ulotu.

Właściwości fizykochemiczne popiołów lotnych z kotłów rusztowych

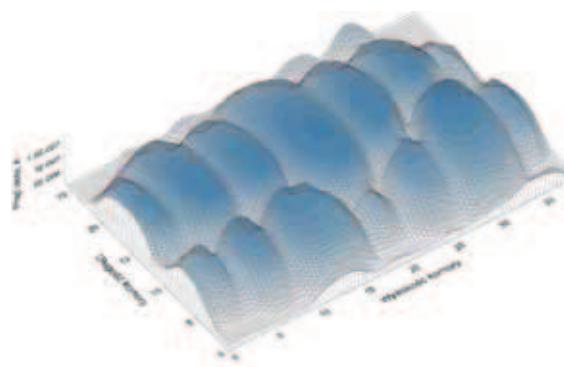
Do badań wybrano popioły lotne z kilku typowych kotłów rusztowych. Zamieszczone w tabeli 1 wyniki analizy własności fizykochemicznych pokazują, że popioły te różnią się zarówno pod względem zawartości niespalonego C, jak i zawartości glino-krzemianów, związków żelaza oraz SO_3 . Analizę składu ziarnowego wykonaną automatycznym miernikiem składu ziarnowego Mastersizer S firmy Malvern Instruments Ltd. pokazano na rys. 5. Charakterystyki rozkładów ziarnowych pokazują znaczne zróżnicowanie poszczególnych popiołów. Przykładowo wstępne odpylanie w baterii cyklonów powoduje, że w popiele lotnym (P-3) pojawia się niewielka ilość ziaren grubych. Dla popiołu P-3 średnica medialna wynosi $d_{50}=20 \mu\text{m}$, a dla popiołu P-2 (bez wstępnego odpylania) $d_{50}=200 \mu\text{m}$.

Analiza ziarnowa niezależnie od zastosowanej metody pomiarowej przypisuje ziarnom jeden parametr geometryczny tzw. średnicę zastępczą. Rzeczywiste kształty ziaren pyłu rzadko bywają kuliste, co ilustruje rys. 6.

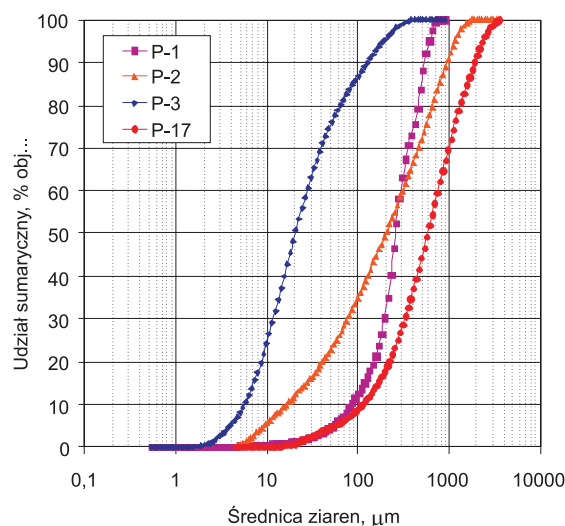
Skuteczności odpylania popiołu lotnego w warunkach laboratoryjnych

W celu wykazania wpływu konstrukcji elektrody ulotowej oraz własności fizykochemicznych popiołu lotnego na skuteczność odpylania wykonano badania w warunkach laboratoryjnych.

Stanowisko badawcze (rys. 7), na którym przeprowadzono pomiary skuteczności odpylania, to model komory elektrofiltru wraz z układem elektrod zbiorczych i ulotowych, kanału doprowadzającego i odprowadzającego powietrze, podajnika pyłu, zasilacza wysokiego napięcia i wentylatora wyciągowego. Charakterystyczne parametry modelu to:



Rys. 4. Rozkład prądu ulotu na powierzchni elektrody zbiorczej uzyskany dla elektrody RDE-2, napięcie zasilania $U=50 \text{ kV}$

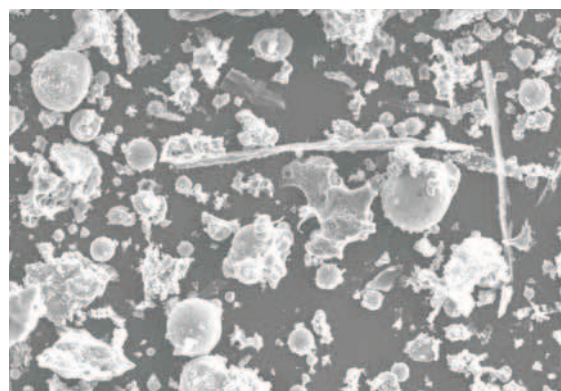


Rys. 5. Skład ziarnowy badanych popiołów lotnych: objętościowe udziały sumaryczne

długość pola elektrycznego $L=2000 \text{ mm}$, wysokość pola $H=450 \text{ mm}$, podziałka międzyelektrodowa $2h=400 \text{ mm}$, odległość pomiędzy elektrodami ulotowymi $s=170 \text{ mm}$.

Na rys. 8 pokazano średnie wartości skuteczności odpylania przy zastosowaniu czterech typów elektrod ulotowych dla popiołu P-2 (WR-25) oraz P-3 (WR-15).

Przyjmując, że popiół P-2 (WR-25) ma typowy skład ziarnowy dla kotłów rusztowych (bez wstępnego odpylania za pomocą urządzeń mechanicznych), odpowiednią konstrukcją elektrody ulotowej, dla pyłów o podobnych właściwościach fizykochemicznych, są elektrody typu RDE-2 lub taśma. Zauważa się, że istnieje pewna optymalna wartość napięcia zasilania (w badanym przypadku wynosi ona ok. 50 kV), powyżej której wzrost napięcia nie tylko nie podwyższa skuteczności odpylania, ale powoduje jej obniżenie. Wydaje się więc, że w innych przypadkach rów-



Rys. 6. Fotografia wykonana mikroskopem skaningowym: pył P-2 z kotła WR-25 (pow. $230'$)

Tab. 1. Wyniki analizy fizykochemicznej popiołów lotnych z wybranych kotłów rusztowych

Skład chemiczny, %	Oznaczenie pyłu			
	P-1 OR-36	P-2 WR-25	P-3 WR-15	P-17 WR-8
SiO ₂	47,44	28,99	28,64	40,39
Fe ₂ O ₃	6,91	3,67	8,62	10,01
Al ₂ O ₃	19,65	17,14	18,06	18,09
TiO ₂	0,99	0,86	1,09	0,96
CaO	3,98	2,82	2,84	5,44
MgO	1,41	1,01	0,98	1,47
SO ₃	0,73	2,26	6,48	1,27
K ₂ O	3,03	2,68	2,48	2,08
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01	-
Na ₂ O	1,33	1,14	1,17	1,47
Niespalony węgiel	13,77	28,60	27,72	17,92
Gęstość, kg/m ³	1850	2090	2350	1760
Rezystywność, Ω·cm	5,1×10 ⁸	5,0×10 ⁷	6,4×10 ⁷	5,0×10 ⁷

Warto zapamiętać

Badania laboratoryjne wybranych konstrukcji elektrod ulotowych obejmowały pomiary charakterystyk I-U, pomiary rozkładu prądu ulotu na powierzchni elektrody zbiorczej (płyta) oraz skuteczności odpylania w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane dane wskazują, że elektrody typu RDE-2 oraz taśma mogą być zastosowane w elektrofiltrach kotłów rusztowych do odpylania popiołów lotnych o właściwościach zbliżonych do popiołów typ P-2 oraz P-3.

Tym samym potwierdzono, że dla pyłów niskorezystywnych, jakimi są popioły pochodzące z kotłów rusztowych, optymalną konstrukcją sztywnej elektrody ulotowej jest elektroda o charakterystyce tzw. „agresywnej”. Jako dodatkowy parametr, pomocny przy doborze elektrody ulotowej, przyjęto równomierność rozkładu prądu na powierzchni elektrody zbiorczej. Dla przykładu elektroda ulotowa RDE-2 (tzw. typ gwoździowy) cechuje się równomiernym rozkładem prądu, zapewniając przy tym wysoką średnią wartość prądu ulotu.

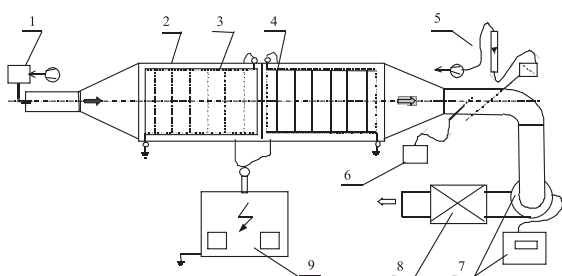
Wyniki badań laboratoryjnych pokazały, że istnieje zależność pomiędzy właściwościami fizykochemicznymi popiołów lotnych, a skutecznością ich osadzania się w elektrofiltrze oraz wskazały na istotny związek skuteczności odpylania z konstrukcją elektrody ulotowej. Należy również zaznaczyć, że w przypadku elektrod sztywnych kształty ostrzy, ich rozstaw i konfiguracja względem płaszczyzny elektrody zbiorczej mogą być bardzo zróżnicowane. W związku z tym, zależnie od warunków pracy i pożądanego kształtu charakterystyki prądowo-napięciowej, pozwalają one na uzyskiwanie praktycznie dowolnych przebiegów zależności I-U.

Przedstawione konstrukcje elektrod ulotowych (rys. 1) mogą stanowić alternatywne rozwiązanie, np. dla wymiany tradycyjnych „tasiemek” w ramach na bardziej trwałe, sztywne elementy nośne z ostrzami.

Praca zrealizowana w ramach projektu NCBiR nr NR06 0014 06.

Literatura dostępna na www.energetyka.e-bmp.pl

Rys. 7. Schemat elektrofiltru laboratoryjnego: 1 – podajnik pyłu, 2 – komora modelu, 3 – elektrody zbiorcze, 4 – elektrody ulotowe, 5 – pyłomierz grawimetryczny, 6 – termooanemometr, 7 – wentylator wyciągowy z regulacją obrotów, 8 – filtr końcowy, 9 – zasilacz wysokiego napięcia



nie należałoby optymalizować wartość napięcia wtórnego. Wyniki badań osadzania się pyłu P-3, pochodzącego z kotła WR-15 z wstępnym mechanicznym odpylaniem spalin, wykazały, że korzystną konstrukcją będzie elektroda typu taśma.

Rys. 8. Charakterystyka średniej skuteczności odpylania dla czterech typów elektrod ulotowych: a) popiół P-2, b) popiół P-3 (dla prędkości powietrza v=0,8 m/s)

