

OGRANICZENIE EMISJI CZĄSTEK SUBMIKRONOWYCH ZA POMOCĄ AGLOMERACJI ELEKTROSTATYCZNEJ

Andrzej Krupa¹, Anatol Jaworek¹, Artur Marchewicz¹, Arkadiusz T. Sobczyk¹, Tadeusz Czech¹,
Michał Szudyga², Andrzej Ottawa², Teresa Antes², Łukasz Śliwiński², Adam Charchalis³

¹ Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego, Polska Akademia Nauk, Fiszerka 14, 80-231 Gdańsk

² RAFAKO S.A., Zakład Instalacji Odpylania Spalin, ul. Górnośląska 3A, 43-200 Pszczyna

³ Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: krupa@imp.gda.pl

STRESZCZENIE

Celem pracy było opracowanie urządzenia do bardziej skutecznego oczyszczania gazów odlotowych z cząstek submikronowych emitowanych przez energetykę spalającą węgiel kamienny i w ten sposób ograniczenie zanieczyszczenia środowiska. W pracy przyjęto jako najskuteczniejsze rozwiązania wykorzystujące procesy elektrostatyczne. Rozwiązania dotychczas stosowane w elektrofiltracji opracowane zostały dla cząstek dużych, zwykle o rozmiarach $>5 \mu\text{m}$, które można łatwo usunąć w wyniku działania siły elektrostatycznej na elektrycznie naładowane cząstki. W zakresie cząstek submikronowych ($0.1\text{--}1 \mu\text{m}$) skuteczność odpylania elektrofiltrów jest minimalna, przede wszystkim ze względu na niską wartość ładunku elektrycznego na takich cząstkach. W celu uniknięcia problemów z usuwaniem submikronowych cząstek popiołu lotnego z gazów spalinowych zastosowano aglomerację elektrostatyczną. W procesie tym poprzez zastosowanie przemiennego pola elektrycznego wprowadza się większe cząstki ($>1 \mu\text{m}$) naładowane elektrycznie w ruch oscylacyjny, w wyniku którego cząstki te „zbierają” mniejsze nienaładowane cząstki. W opracowanym aglomeratorze z przemiennym polem elektrycznym, proces ładowania cząstek oraz ich koagulacji zachodzi w jednym stopniu, co znacznie uprościło konstrukcję urządzenia w porównaniu z innymi rozwiązaniami. Zakres badań obejmował pomiary frakcyjnej skuteczności odpylania cząstek w układzie aglomerator/elektrofiltr dla zakresów PM1 i PM2.5 w urządzeniu wykonanym w skali półtechnicznej. Całkowita skuteczność ilościowa odpylania dla cząstek PM2.5 była większa od 90%, a dla PM1 nieznacznie spadała poniżej 90%. Masowa skuteczność odpylania dla cząstek PM2.5 była większa niż 95%. Stopień aglomeracji powoduje wzrost skuteczności odpylania dla cząstek PM1 na poziomie 5–10%.

Słowa kluczowe: filtr elektrostatyczny, cząstki submikronowe

SUBMICRON PARTICLES EMISSION CONTROL BY ELECTROSTATIC AGGLOMERATION

ABSTRACT

The aim of the study was to develop a device for more effective treatment of flue gases from submicron particles emitted by power plants burning bituminous coal and by this way the reduction of environment pollution. Electrostatic processes were employed to this goal, as the most effective solution. The solutions hitherto applied in electrostatic precipitation techniques were designed for large particles, typically with sizes $>5 \mu\text{m}$, which are easily removed by the action of electrostatic force on the electrically charged particles. In submicron size range ($0.1\text{--}1 \mu\text{m}$) the collection efficiency of an ESP is minimal, because of the low value of electric charge on such particles. In order to avoid problems with the removal of submicron particles of fly ash from the flue gases electrostatic agglomeration has been used. In this process, by applying an alternating electric field, larger charged particles ($> 1 \mu\text{m}$) oscillate, and the particles “collect” smaller uncharged particles. In the developed agglomerator with alternating electric field, the charging of particles and the coagulation takes place in one stage that greatly simplified the construction of the device, compared to other solutions. The scope of this study included measurements of fractional collection efficiency of particles in the system comprising of agglomerator and ESP for PM1 and PM2.5 ranges, in device made in pilot scale. The collection efficiency for PM2.5 was greater than 90% and PM1 slightly dropped below 90%. The mass collection efficiency for PM2.5 was greater than 95%. The agglomerator stage increases the collection efficiency for PM1 at a level of 5–10%.

Keywords: electrostatic precipitation, submicron particles, PM removal

WSTĘP

Zainteresowanie problemem emisji cząstek submikronowych, PM_{2.5} wynika z poważnego zagrożenia, jakie niosą one dla zdrowia ludzi. Wielokrotnie stwierdzono, że cząstki submikronowe zawierają wiele związków chemicznych metali ciężkich, głównie: Se, Zn, As, Cd, Hg, Ni, Pb, Cr, Sr, Be, V i U oraz WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) w stężeniach większych niż cząstki o większych rozmiarach. Duże cząstki pyłu (>PM₁₀) są wyłapywane przez nos, średniej wielkości cząsteczki pyłu (PM_{2.5}-PM₁₀) są rozpuszczane w śluzie a następnie usuwane poprzez kaszel lub połykanie. Natomiast cząstki PM_{2.5} poprzez układ oddechowy docierają do pęcherzyków płucnych a następnie mogą przenikać do krwiobiegu zaburzając układ odpornościowy, powodując osłabienie organizmu i zwiększając ryzyko zachorowania oraz mają przewlekłe oddziaływanie na organizm ludzki, a WWA są kancerogenne (Raport EPA (Environmental Protection Agency) [2007], Raport WHO [2006]). Wg raportów EPA drobne pyły submikronowe są przyczyną wielu zachorowań głównie na choroby serca, płuc i astmy. Szczególnie wrażliwe na ekspozycję na pył PM_{2.5} są osoby starsze, osoby z chorobami serca i płuc oraz dzieci.

Cząstki o średnicy od 0.2 do 2 μm należą do tzw. zakresu „Greenfield gap”. Cząstki te, o średnicy porównywalnej z długością promieniowania w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, w decydujący sposób wpływają na rozpraszanie światła. Greenfield [1957] odkrył, że cząstki te nie są usuwane przez opady atmosferyczne i mogą bardzo długo (kilka miesięcy) pozostawać zawieszane w powietrzu przemieszczając się na duże odległości, nawet transkontynentalne. Oprócz źródeł naturalnych cząstek, takich jak: wybuchy wulkanów, pożary, lub burze piaskowe, cząstki z tego zakresu wielkości emitowane są przez źródła antropogeniczne: kotły energetyczne, spalarnie, procesy produkcyjne, silniki spalinowe (głównie Diesla). Zmniejszenie emisji ze źródeł antropogenicznych jest więc obecnie pilną potrzebą w celu ograniczenia dalszej degradacji środowiska.

Wg Raportu Krajowego Bilansu Emisji z 2012 roku, obejmującego lata 2009 i 2010 podstawowymi źródłami emisji pyłów PM_{2.5} były m.in.: spaliny i gazy odlotowe pochodzące ze spalarni i procesów spalania w ciepłownictwie – ponad 68 299 ton, z procesów spalania w sektorze pro-

dukcji i transformacji energii – 14 337 ton (głównie Elektrownie zawodowe i elektrociepłownie na węgiel kamienny oraz brunatny), procesów spalania w przemyśle – 7199 ton oraz procesów produkcyjnych, w tym ok. 1700 ton z produkcji cementu oraz 1000 ton z produkcji koksu [Raport KBE 2012]. Z wymienionych źródeł pochodzi ok. 61% całkowitej emisji. Emisje z transportu drogowego oraz innych pojazdów i maszyn stanowiły ok. 20% całkowitej emisji PM_{2.5} w Polsce. Emisja pyłu PM_{2.5} ze spalania oleju napędowego ON oraz ciężkich paliw żeglugowych w roku 2010 wyniosła 22 500 ton. Wzrost krajowej emisji pyłu PM_{2.5} wynika z większego zużycia węgla kamiennego w produkcji ciepła i energii oraz oleju napędowego w transporcie. Dane te wskazują na ogromną skalę zjawiska emisji pyłów submikronowych do atmosfery.

Większość cząstek emitowanych w procesie spalania znajduje się w zakresie cząstek submikronowych. Mimo, że cząstki submikronowe obejmują ponad 90% całkowitej liczby cząstek znajdujących się w spalinach to ze względu na znikome rozmiary, ich masa praktycznie nie wpływa na sumaryczną masę wszystkich cząstek emitowanych.

W obszarze energetyki zawodowej spalającej głównie węgiel kamienny, najczęściej stosowanymi urządzeniami do oczyszczania gazów odlotowych są elektrofiltry a w drugiej kolejności filtry tkaninowe. Zakres wielkości emitowanych cząstek po spalaniu węgla kamiennego zawiera się w przedziale od kilkunastu nanometrów do kilkuset mikrometrów. Powszechnie znaną wadą elektrofiltrów jest ich minimalna skuteczność odpylania w zakresie cząstek submikronowych (tzn. 0.1–1 μm). Ze względu na obowiązujące przepisy ograniczające masową emisję popiołów lotnych, stosowane dotychczas w energetyce rozwiązania opracowane zostały dla cząstek dużych, zwykle o rozmiarach >5 μm. Większe cząstki można łatwo usunąć w wyniku działania siły elektrostatycznej na elektrycznie naładowane cząstki, a mniejsze niż 100 nm osadzają się na większych pod wpływem dyfuzji, siły elektroforezy i ruchów Browna. Niska skuteczność elektrofiltrów w zakresie cząstek submikronowych wynika przede wszystkim z niskiej wartości ładunku elektrycznego, do której można naładować cząstki submikronowe, nieprzekraczającej kilku ładunków elementarnych e , i zmniejszającej się wraz ze zmniejszaniem wielkości cząstki. Można w praktyce powiedzieć, że cząstki <100 nm nie

są naładowane elektrycznie. Ze względu na mały ładunek elektryczny cząstek, siła elektryczna działająca na cząstkę jest zbyt słaba, aby pokonać siły oporu gazu, który unosi cząstkę z elektrofiltru do atmosfery. Z drugiej strony, siły elektroforezy i ruchy Browna są zbyt słabe, aby spowodować koagulację tych cząstek z cząstkami większymi.

W celu rozwiązania problemów z usuwaniem submikronowych cząstek popiołu lotnego z gazów spalinowych lub odlotowych już w latach 70 XX wieku zaproponowano różne rozwiązania techniczne wspomagające proces aglomeracji cząstek, które po zwiększeniu ich wielkości można byłoby w konwencjonalny sposób usunąć z gazu. Zastosowano w tym czasie aglomerację akustyczną i elektrostatyczną. Jednak okazało się, że w celu efektywnej aglomeracji akustycznej (wprowadzenie cząstek w ruch drgający za pomocą fali akustycznej) wymagana energia akustyczna jest zbyt duża, aby proces ten był opłacalny ekonomicznie. Drugie rozwiązanie, aglomeracja elektrostatyczna, również posiadało swoje wady polegające na konieczności wielokrotnego ładowania ładunkiem o różnych polaryzacjach aglomerowanych cząstek, który ulegał neutralizacji po zderzeniu dwóch cząstek o przeciwnych ładunkach elektrycznych. Aglomeracja elektrostatyczna bipolarna wymagała więc znacznej rozbudowy całego urządzenia filtracyjnego, co czyniło całe przedsięwzięcie nieopłacalnym ekonomicznie na etapie inwestycyjnym. Dlatego również aglomeracja elektrostatyczna nie doczekała się zbyt wielu wdrożeń komercyjnych.

W znanych z literatury aglomeratorach elektrostatycznych, procesy ładowania cząstek, aglomeracji i osadzania są zwykle oddzielone i realizowane w dwóch lub trzech różnych stopniach (White [1974], Masuda i Washizu [1979], Masuda i Hosokawa [1982], McLean [1988]). Na przykład, cząsteczki najpierw przechodzą przez dwa równoległe elektryzatory o przeciwnych polaryzacjach, a następnie do stopnia filtracji elektrostatycznej. W innej wersji, cząstki są ładowane w jednobiegowym elektryzatorze i wprowadzone do stopnia koagulacji pomiędzy dwiema równoległymi płytkami, pomiędzy którymi wytwarza się zmienne pole elektryczne, a na koniec do stopnia elektrofiltru, w którym są wyłapywane.

W rozwiązaniu zaproponowanym w niniejszej pracy, wykorzystano proces aglomeracji unipolarnej ciągłego ładowania i aglomeracji cząstek w jednym urządzeniu [Jaworek et al. 2015]. Aglomerator jednostopniowy bazuje na elektryzatorze

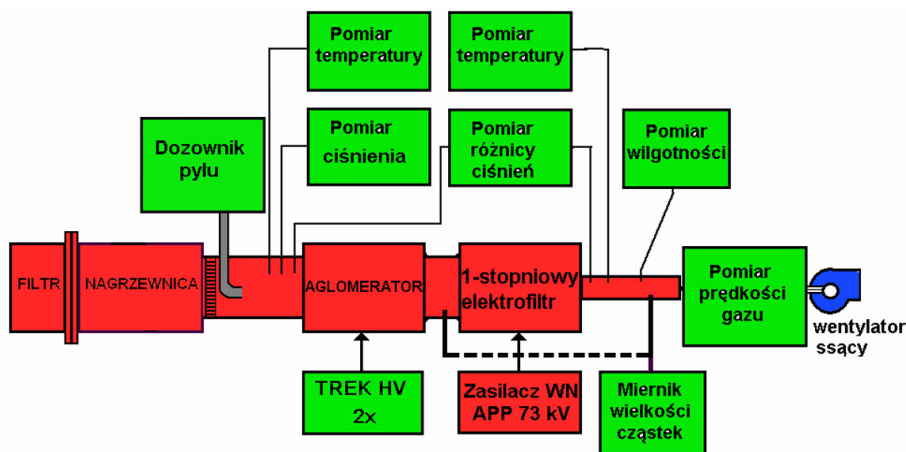
zmiennego pola elektrycznego utworzonym przez zestaw dwóch elektrod wyładowczych oddzielonych przez zestaw dwóch równoległych siatek z każdej strony elektrod wyładowczych [Jaworek i Krupa 1989, Jaworek et al. 2003]. W tego typu elektryzatorze, cząstki są ładowane przez prąd jonowy w zmiennym polu elektrycznym, a ładunek cząstek może być wyższy niż w przypadku elektryzatora prądu stałego. W procesie aglomeracji poprzez jednoczesne zastosowanie wyładowania elektrycznego i przemiennego pola elektrycznego, większe cząstki ($>1 \mu\text{m}$) ładowane są elektrycznie i wprowadzane w ruch oscylacyjny, w wyniku którego cząstki te „zbierają” mniejsze nienaładowane cząstki. Cząstki opuszczające aglomerator posiadają ładunek elektryczny i mogą być następnie usunięte przez umieszczony za aglomeratorem elektrofiltr konwencjonalny lub elektrofiltr bez wyładowania elektrycznego (para elektrod płaskorównoległych).

STANOWISKO BADAWCZE

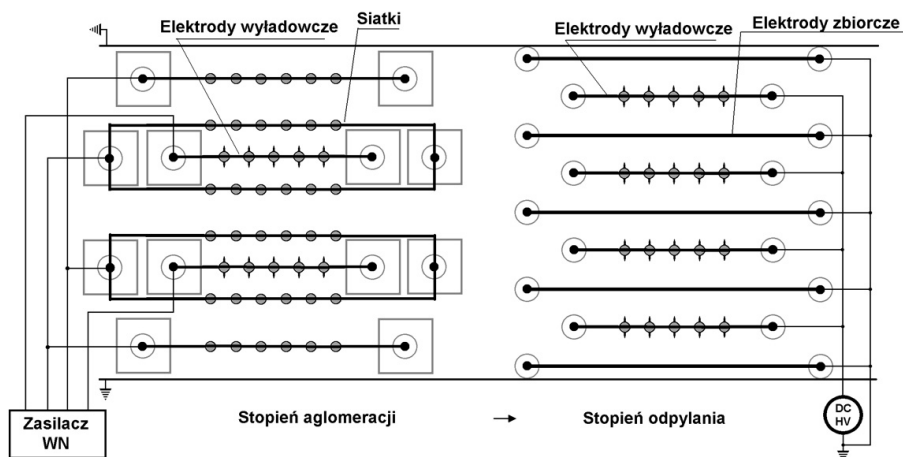
Badania procesu aglomeracji i usuwania cząstek submikronowych z gazu przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym przedstawionym schematycznie na rysunku 1. Powietrze przepływające w kanale filtrowane jest przez filtry HEPA, umieszczone na wlocie do kanału. Za filtrem umieszczono elektryczny podgrzewacz powietrza do ustalania temperatury gazu w zakresie od 20°C do 100°C . Temperatura mierzona jest bezpośrednio za podgrzewaczem i na wyjściu z kanału za pomocą termometrów PT100. Przepływ powietrza przez kanał został wymuszony przez wentylator ssący umieszczony na wylocie układu. Prędkość przepływu powietrza mierzono za pomocą przepływomierza wirowego Prowirl F 200 firmy Endress & Hauser. Prędkość przepływu może być zmieniana w zakresie od 0 do 1 m/s. Cząstki popiołu wstrzykiwano do kanału za nagrzewnicą powietrza przez podajnik pyłu z masowym natężeniem przepływu w zakresie od 1 do 2.7 kg/h.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy eksperymentalnego elektryzatora/aglomeratora i filtru elektrostatycznego umieszczonego na stanowisku w Akademii Morskiej w Gdyni a na rys. 3 widok elektrod eksperymentalnego aglomeratora/elektryzatora pokrytych popiołem lotnym.

Jednostopniowy elektryzator/aglomerator wywodzi się z elektryzatora ze zmiennym polem elektrycznym [Jaworek i Krupa 1989] utworzo-



Rys. 1. Schemat stoiska doświadczalnego aglomeratora i jednego stopnia elektrofiltru
Fig. 1. The scheme of experimental stand of precharger/agglomerator and one stage ESP



Rys. 2. Schemat ideowy eksperymentalnego elektryzatora i filtra elektrostatycznego umieszczonego w na stanowisku w Akademii Morskiej w Gdyni
Fig. 2 The scheme of precharger/agglomerator and one stage ESP build in AMG



Rys. 3. Widok elektrod aglomeratora/elektryzatora (elektrody pokryte popiołem lotnym)
Fig. 3. The set of electrodes of precharger/agglomerator (Electrodes covered with fly ash)

nego przez zestaw dwóch elektrod wyladowczych oddzielonych przez zestaw dwóch równoległych siatek z każdej strony elektrod wyladowczych. Dwie dodatkowe siatki spoza tego układu elektrod są wykorzystywane do utrzymywania symetrycznej emisji prądu przez elektrody wyladowcze z każdej strony. W tego typu elektryzatorze, cząstki są ładowane przez prąd jonowy w zmiennym polu elektrycznym. Zmienne pole elektryczne w elektryzatorze/aglomeratorze zmusza naładowane cząstki do ruchu oscylacyjnego, a częściowo do aglomeracji podczas ruchu, ale ogranicza ruch w kierunku elektrod. Z powodu oscylacyjnego ruchu cząstek pomiędzy elektrodami tylko mała ilość cząstek wytrąca się w tym stopniu.

Stopień elektrofiltru widoczny po prawej stronie rysunku 2 jest konwencjonalnym elek-

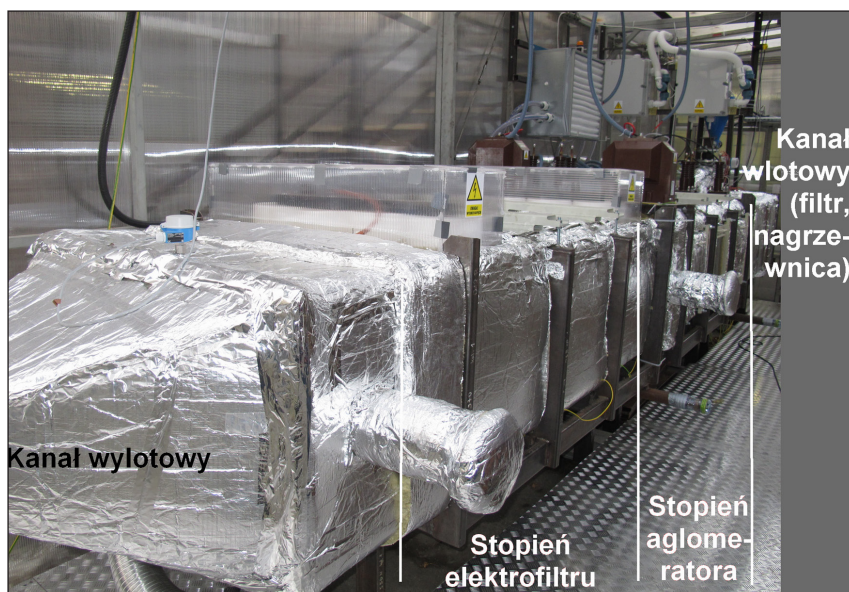
trofiltrem jednostopniowym wyprodukowanym przez firmę RAFAKO S.A., przeskalowanym na potrzeby prowadzonych badań. Elektrofiltr złożony jest z czterech par uziemionych elektrod zbiorczych, pomiędzy którymi znajdują się elektrody wyładowcze w postaci drutów kolczastych rozciągniętych na prostokątnej ramie. Elektrody wyładowcze zasilane są napięciem stałym o wartości dochodzącej do 55 kV.

Elektryzator/aglomerator elektrostatyczny i elektrofiltr zostały umieszczone w kanale o szerokości ok. 1 m wysokości i 0.6 m wykonanym ze stali. Elektrody w elektryzatorze/aglomeratorze były zasilane z dwóch transformatorów wysokiego napięcia (36 kV) poprzez obwód wykonany z diod i rezystorów sterujący rozkładem potencjałów na elektrodach. W każdym półokresie napięcia zasilania, prąd jonowy emitowany przez elektrodę wyładowczą utrzymwaną na potencjale ujemnym przepływa przez siatkę, która jest na potencjale ziemi, i poprzez strefę ładowania między siatkami, w kierunku siatki na potencjale dodatnim. Potencjały siatek i elektrod wyładowczych zmieniają się naprzemiennie w każdym półokresie napięcia zasilającego, a elektrody zamieniają się także rolami. Cząstki przepływające przez strefę ładowania są ładowane elektrycznie i opuszczają elektryzator jako cząstki naładowane. Ze względu na ruch oscylacyjny, cząstki o różnej ruchliwości zderzają się i koagulują, co zwiększa wartość średnią rozkładu wielkości cząstek. Cząstki opuszczające sekcję elektryzatora/aglomeratora są następne usuwane w sekcji elektrofiltru.

Na rysunku 4 pokazano zdjęcie kanału elektryzatora/aglomeratora elektrostatycznego i jednostrefowego elektrofiltru umieszczonego w Laboratorium Siłowni Okrętowych na Akademii Morskiej w Gdyni.

Eksperymenty przeprowadzono dla cząstek popiołu zebranych z 3 stopnia elektrofiltru z elektrowni opalanej węglem kamiennym. Mikrofotografię SEM cząstek popiołu lotnego stosowanego w eksperymentach pokazano na rysunku 5. Widmo EDS cząstek popiołu lotnego uzyskane przez mikroanalizator EDS Bruker Qantax-400 jest przedstawione na rysunku 6 a ich skład pierwiastkowy w tabeli 1. Większość cząstek było kulistych, co jest charakterystyczne dla popiołu z kotłów opalanych węglem, a ich średnica była mniejsza niż 2.5 μm . Cząstki popiołu lotnego składają się głównie z krzemu, glinu, żelaza, potasu, magnezu, sodu i tlenu, który tworzy tlenki tych pierwiastków.

Objętościowy rozkład wielkości cząstek przedstawiono na rysunku 8a, a rozkład ilościowy wielkości cząstek na rysunku 8b. Średnia średnica cząstek wynosiła około 1.5 μm a średnia średnica Sautera 3.3 μm . Koncentrację cząstek mierzono na wylocie z kanału, stosując spektrometr wielkości cząstek aerozolu LAP 322 (TOPAS) z układem rozcieńczenia próbek 1: 100 firmy PALAS. Próbkę pyłu pobierano za pomocą sondy izokinetycznej. Wszystkie sygnały pomiarowe były rejestrowane przez rejestrator RSG40 Memograph M firmy Endress & Hauser.



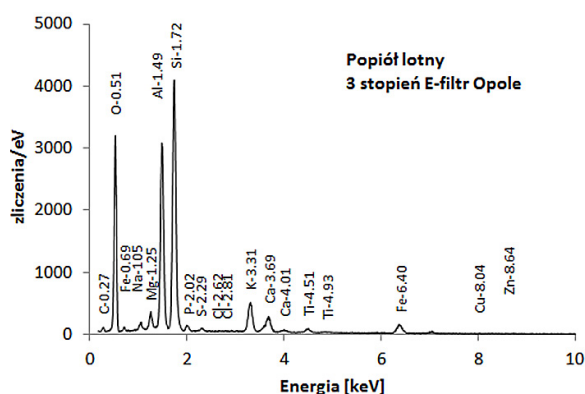
Rys. 4 Widok kanału elektryzatora/aglomeratora elektrostatycznego i jednostrefowego elektrofiltru umieszczonego w AMG.

Fig. 4 The experimental channel with of precharger/agglomerator and one stage ESP build in AMG.



Rys. 5. Mikrofotografia SEM cząstek popiołu lotnego (SEM Zeiss EVO 40)

Fig. 5. SEM microphotograph of fly ash particles (SEM Zeiss EVO 40)



Rys. 6. Widmo EDS cząstek popiołu lotnego (EDS Bruker Qantax-400)

Fig. 6. EDS spectrum of fly ash particles (EDS Bruker Qantax-400)

Tabela 1 Skład pierwiastkowy cząstek popiołu lotnego

Table 1 The elemental composition of the fly ash particles

| Pierwiastek | Mas. % | At. % | Błąd % |
|-------------|--------|-------|--------|
| Tlen | 48.19 | 61.02 | 5.88 |
| Krzem | 20.02 | 14.44 | 0.88 |
| Aluminium | 15.88 | 11.92 | 0.79 |
| Potas | 3.66 | 1.90 | 0.14 |
| Żelazo | 3.09 | 1.12 | 0.12 |
| Węgiel | 3.04 | 5.13 | 0.84 |
| Magnez | 1.69 | 1.41 | 0.13 |
| Sód | 1.17 | 1.03 | 0.11 |
| Wapń | 1.15 | 0.58 | 0.06 |
| Fosfor | 0.66 | 0.43 | 0.06 |
| Tytan | 0.57 | 0.24 | 0.05 |
| Fluor | 0.52 | 0.55 | 0.21 |
| Siarka | 0.32 | 0.20 | 0.04 |
| Miedź | 0.03 | 0.01 | 0.01 |

WYNIKI POMIARÓW

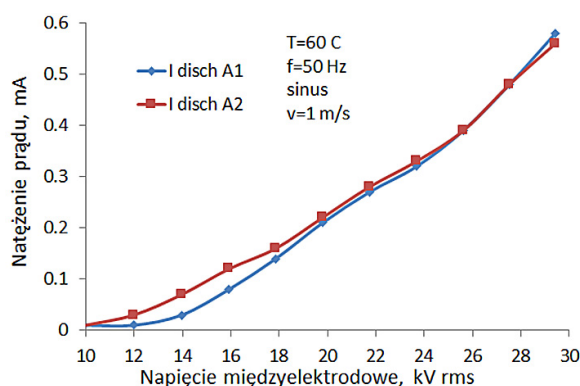
Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe charakterystyki napięciowo-prądowe elektryzatora. Charakterystyki przedstawiają zależność natężenia prądu wyładowania z poszczególnych elektrod wyładowczych (A1 i A2) od napięcie między elektrodami. Charakterystyki są zgodne z prawem Townsenda.

Na rysunkach 8a i 8b przedstawiono odpowiednio rozkłady objętościowe i ilościowe wielkości cząstek na wyjściu z elektryzatora i jedno-stopniowego elektrofiltru dla załączonych i wyłączonych napięć zasilających AC i DC.

Koncentracja cząstek w przypadku wyłączenia zasilania elektryzatora/aglomeratora i jedno-stopniowego elektrofiltru wahała się pomiędzy 10 000 a 14 000 /cm³. Gdy elektryzator był włączony to koncentracja cząstek spadała poniżej 8000 /cm³. Wielkość cząstek w maksimum rozkładu objętościowego, w przypadku wyłączonego napięcia zasilającego elektryzator/aglomeratora, wynosiła około 3.7 μm i wzrastała do około 4.5 μm podczas załączenia elektryzator/aglomeratora.

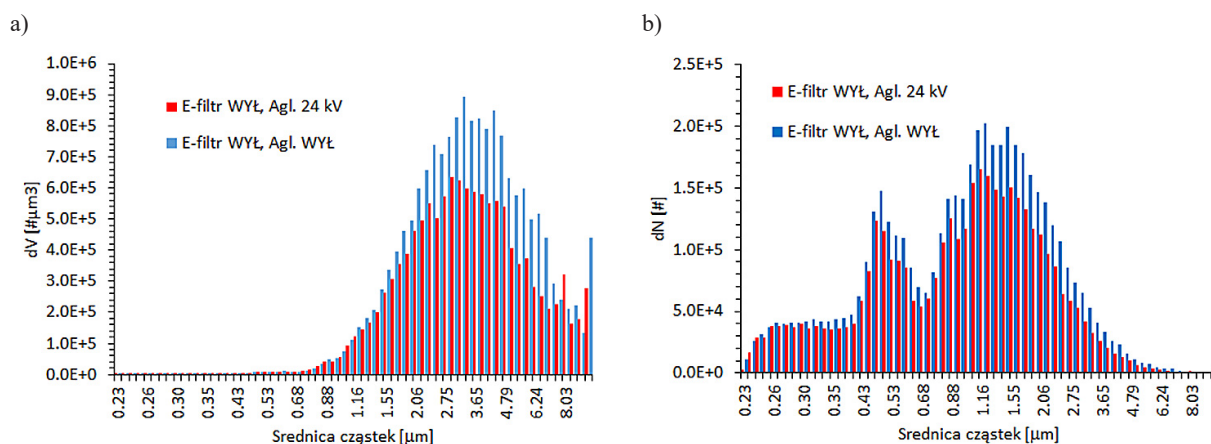
Na rysunkach 9a i 9b przedstawiono odpowiednio rozkłady objętościowe i ilościowe wielkości cząstek na wyjściu z elektryzator/aglomeratora i jedno-stopniowego elektrofiltru dla załączonego i wyłączonego napięcia zasilającego elektryzator/aglomeratora i elektrofiltru.

Średnia średnica cząstek w przypadku włączonego napięcia zasilającego elektryzator/aglomeratora i elektrofiltru wynosiła około 1.26 μm i obniżała się do około 0.9 μm w przypadku włączonego napięcia zasilającego elektryzator/aglomerator i elektrofiltru.



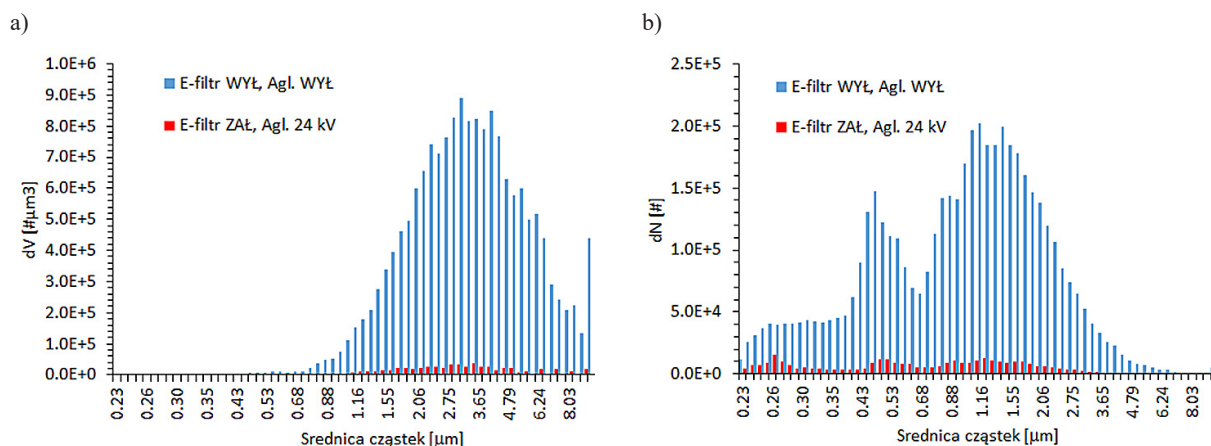
Rys. 7. Charakterystyki napięciowo-prądowe elektryzatora/aglomeratora. Natężenie przepływu popiołu lotnego 1.5 kg/h

Fig. 7. Current voltage characteristic of precharger/agglomerator. Fly ash loading 1.5 kg/h



Rys. 8. Rozkład widmowy wielkości cząstek na wyjściu z elektryzatora i jednostopniowego elektrofiltru dla załączonego i wyłączonego napięcia zasilającego elektryzator/aglomerator (elektrofiltr wyłączony): a) Rozkład objętościowy, b) Rozkład ilościowy

Fig. 8. Particle size distribution after precharger/agglomerator and ESP. Precharger/agglomerator is switched ON and OFF. ESP is switched OFF



Rys. 9. Rozkład widmowy wielkości cząstek na wyjściu z elektryzatora/aglomeratora i jednostopniowego elektrofiltru dla załączonego i wyłączonego napięcia zasilającego elektryzator i elektrofiltr: a) Rozkład objętościowy, b) Rozkład ilościowy

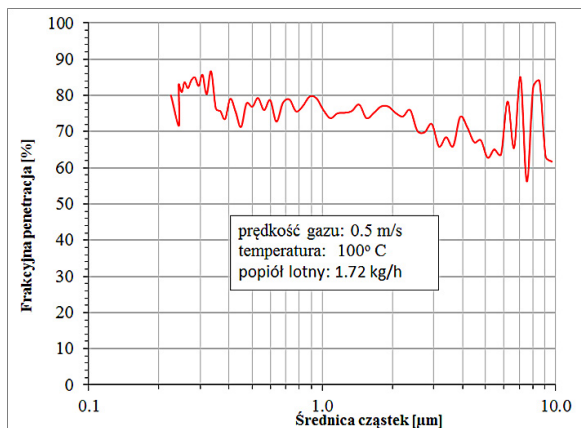
Fig. 9. Particle size distribution after precharger/agglomerator and ESP. Precipitation system is switched ON and OFF

Frakcyjna penetracja cząstek poprzez elektryzator/aglomerator została wyznaczona eksperymentalnie. 60–70% cząstek przechodzi przez elektryzator przy zasilaniu 24 kV_{AC} i przy prędkości gazu w kanale 0.5 m/s. Cząstki te są następnie wytrącane w elektrofiltrze (rys. 10). Zmienne pole elektryczne w elektryzatorze/aglomeratorze wprawia naładowane cząstki w ruch oscylacyjny, co powoduje ich aglomerację podczas ruchu, ale zapobiega równocześnie ich wytrącaniu się na elektrodach. W związku z oscylacyjnym ruchem cząstek pomiędzy elektrodami tylko niewielka ilość cząstek wytrąca się w tym stopniu.

Frakcyjna skuteczność odpylania cząstek przez układ elektryzatora/aglomeratora i jedno-

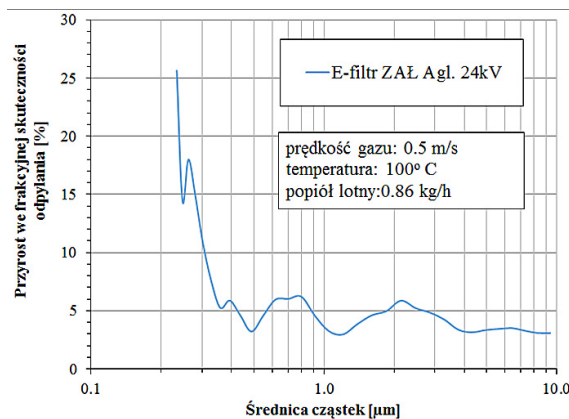
stopniowego elektrofiltru została wyznaczona eksperymentalnie. Na rysunkach 11a i 11b przedstawiono krzywe frakcyjnej skuteczności odpylania cząstek układu elektryzatora/aglomeratora i jednostopniowego elektrofiltru dla prędkości przepływu gazu 0.5 m/s oraz dla masowego natężenia przepływu popiołu odpowiednio 0.86 kg/h i 1.72 kg/h. Ponad 70% cząstek o wielkości poniżej 1 μm jest wyłapywane w układzie oczyszczania i 95% cząstek o wielkości od 1 μm do 10 μm.

Na rysunku 12 przedstawiono wykres przyrostu frakcyjnej skuteczności odpylania cząstek w systemie elektryzator/aglomerator i elektrofiltru w przypadku załączenia zasilania elektryzatora/aglomeratora, dla temperatury gazu 100 °C. W za-



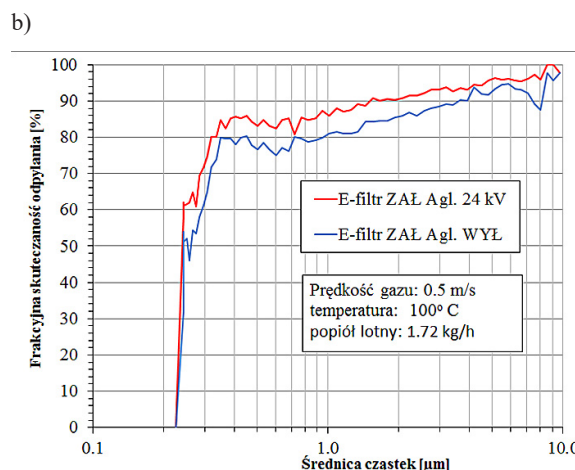
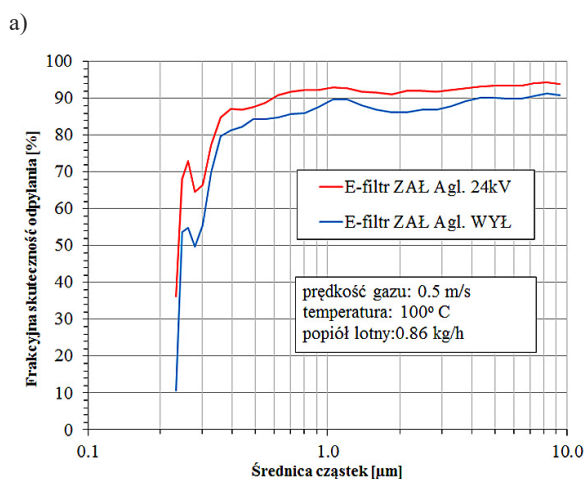
Rys. 10. Frakcyjna penetracja cząstek poprzez elektryzator/aglomerator przy zasilaniu 20 kV_{AC} dla prędkości gazu 0.5 m/s

Fig. 10. The fractional particle penetration in pre-charger/agglomerator. Supply voltage 20 kV_{AC}. Gas velocity 0.5 m/s



Rys. 12. Przyrost frakcyjnej skuteczności odpylania cząstek przez elektryzator/aglomerator i elektrofiltr. Napięcie pracy aglomeratora 24 kV_{AC}. Prędkość gazu 0.5 m/s, temperatura 100 °C

Fig. 12. The increase of fractional collection efficiency in pre-charger/agglomerator and ESP. Agglomerator supply voltage 24 kV_{AC}. Gas velocity 0.5m/s, temperaturę 100 °C



Rys. 11. Frakcyjna skuteczność odpylania cząstek przez elektryzator/aglomerator i elektrofiltr dla prędkości gazu 0.5 m/s i temperatury 100 °C: a) Masowe natężenie przepływu popiołu 0.86 kg/h, b) Masowe natężenie przepływu popiołu 1.72 kg/h

Fig. 11. The fractional collection efficiency in pre-charger/agglomerator. Gas velocity 0.5 m/s. Temperature 100 °C

kresie wielkości cząstek poniżej 0.3 μm przyrost skuteczności odpylania w wyniku załączenia aglomeratora sięga 25%.

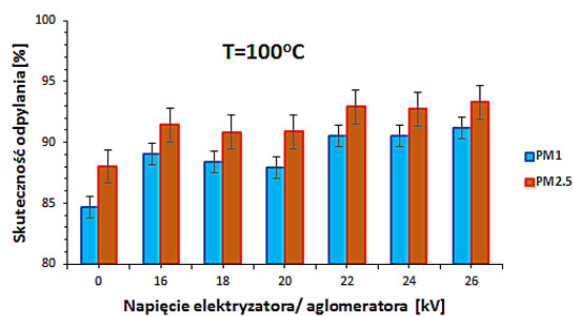
Na rysunku 13 przedstawiono wpływ napięcia zasilania elektryzatora/aglomeratora na skuteczność odpylania cząstek w zakresie PM1 i PM2.5 dla prędkości gazu 0.5 m/s i temperatury 100 °C. Dla napięcia zasilania aglomeratora od 22 kV do 26 kV skuteczność odpylania cząstek w zakresie PM2.5 wynosi powyżej 93% a w zakresie PM1 około 90%.

Na rysunku 14 przedstawiono wpływ napięcia zasilania elektryzatora/aglomeratora na wzrost

skuteczności odpylania cząstek w zakresie PM1 i PM2.5 dla prędkości gazu 0.5 m/s i temperatury 100 °C. Układ aglomeratora powoduje wzrost od 5 do 10% skuteczności odpylania cząstek w zakresie PM1.

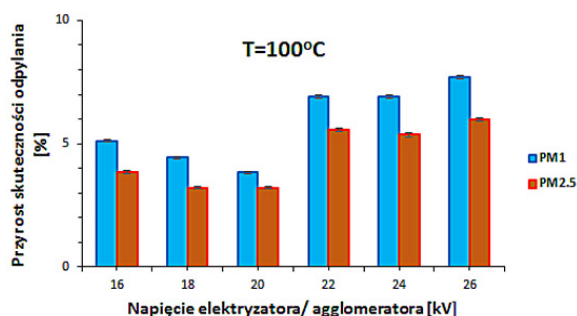
PODSUMOWANIE

Zbadano możliwość podwyższenia frakcyjnej skuteczności odpylania cząstek submikronowych PM2.5 przez ich aglomerację elektrostatyczną. Proces unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej



Rys. 13. Wpływ napięcia zasilania elektryzatora/aglomeratora na skuteczność odpylania cząstek w zakresie PM1 i PM2.5 dla prędkości gazu 0.5 m/s i temperatury 100 °C

Fig. 13. The effect of supply voltage on the collection efficiency for particle PM1 and PM 2.5. Gas velocity 0.5 m/s, temperature 100 °C



Rys. 14. Wpływ napięcia zasilania elektryzatora/aglomeratora na wzrost skuteczności odpylania cząstek w zakresie PM1 i PM2.5 dla prędkości gazu 0.5 m/s i temperatury 100 °C

Fig. 14. The effect of supply voltage on the increase of the collection efficiency for particle PM1 and PM 2.5. Gas velocity 0.5 m/s, temperature 100 °C

zrealizowano za pomocą elektryzatora/aglomeratora współpracującego z elektrofiltrem w skali półtechnicznej. W tego typu urządzeniu elektryzatora/aglomeratora proces ładowania elektrycznego i aglomeracji zachodzi w jednym stopniu dzięki zastosowaniu wyładowania elektrycznego do ładowania cząstek i jednocześnie przemiennego pola elektrycznego wprowadzającego większe cząstki w ruch oscylacyjny. Urządzenie tego typu może pracować jako stopień elektryzacji w elektrofiltrze dwustopniowym. Ilościowa skuteczność odpylania cząstek w zakresie PM2.5 wynosi powyżej 93% i w zakresie PM1 około 90%. Masowa skuteczność odpylania cząstek w tym systemie

w zakresie PM2.5 jest większa niż 95%. Aglomeracyjny moduł powoduje wzrost od 5 do 10% skuteczności odpylania cząstek w zakresie PM1.

Podziękowanie

Praca była finansowana przez NCBiR w ramach projektu 208429 ELAGLOM „Opracowanie innowacyjnej metody ograniczenia emisji cząstek submikronowych w spalinach i gazach odlotowych”.

LITERATURA

- Greenfield S. 1957. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere. *J. Meteorology* 14, 115–125.
- Jaworek A., Krupa A. 1989. Airborne Particle Charging by Unipolar Ions in AC Electric Field. *J. Electrostatics* 23, 361–370.
- Jaworek A., Marchewicz A., Krupa A., Sobczyk A.T., Czech T., Antes T., Śliwiński Ł., Kurz M., Szudyga M., Rożnowski W. 2015. Dust particles precipitation in AC/DC electrostatic precipitator. *Journal of Physics: Conference Series* 646, paper No. 012031, 4 pp.
- Masuda S., Hosokawa Sh. 1982. Performance of two-stage type electrostatic precipitators. *IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. Rec.*, 1094–1101.
- Masuda S., Washizu M. 1979. Ionic charging of a very high resistivity spherical particle *J. Electrostat* 6, No.1, 57–67.
- McLean K.J. 1988. Electrostatic precipitators. *IEE Rev.* 135, Pt.A, No.6, 347–361.
- Raport EPA 2007. Raport of Clean Air Fine Particle Implementation, 20586 Federal Register. Vol. 72, No.79, Wednesday, April 25, 2007, Rules and Regulations.
- Raport KBE 2012. Raport: Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, pyłów, metali ciężkich, NMLZO i TZO w Polsce za lata 2009–2010 w układzie klasyfikacji SNAP i NFR.
- Raport WHO 2006. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. WHO 2006; <http://www.euro.who.int/document/e88189.pdf>.
- White H.J. 1974. Resistivity problems in electrostatic precipitation. *J. Air Poll. Contr. Assoc.* 24, No.4, 314–338.