

doi:10.15199/48.2019.21.13

## Separacja proszków węglowych o dużym stopniu rozproszenia za pomocą metody tryboelektrycznej

**Streszczenie.** W artykule zostały przeanalizowane warunki rozdzielania materiałów węglowych za pomocą metody tryboelektrycznej. Została opracowana konstrukcja i wykonane urządzenie powietrznej separacji tryboelektrycznej z oddzielaczem bębnowym. W drodze eksperymentu ustalono, że zastosowanie wibracji podczas podawania proszku do bębna oraz obróbka cieplna proszków istotnie wpływa na wartość tryboładunków. W celu uzyskania dobrego wyniku rozdzielania materiałów węglowych konieczne jest osuszenie. Materiał osusza się w temperaturze 100 – 120 °C. Otrzymane za pomocą separacji frakcje węglowe zastosowano do budowy superkondensatorów. Określono pojemność właściwą. Ustalono, że największą pojemność właściwą posiada materiał zawierający cząstki o wymiarach 1-10 μm.

**Abstract.** The article deals with conditions for carbon materials separation by triboelectric method. A triboelectric air separation device with a drum separator was designed and constructed. It was proved by experimentation that use of vibrations during the powder's entry into the drum and thermal treatment has a significant effect on the tribocharge value. To achieve good results of carbon material separation, drying is required. The material is dried at 100°-120°C. The carbon fractions acquired by separation were used in construction of ultracapacitors. Specific capacitance was established; with the highest capacitance achieved by material containing particles in 1-10 μm size range. **Highly dispersed carbon powder separation by triboelectric method.**

**Słowa kluczowe:** węgiel aktywny, separacja tryboelektryczna, frakcja, pojemność właściwa.

**Keywords:** activated carbon, triboelectric separation, fraction, specific capacitance.

### Wstęp

Współczesna historia rozwoju społeczeństwa jest historią opracowania i wprowadzenia nowych technologii. Wśród nich jako najważniejsze wymieniane są technologie związane ze stosowaniem pól elektromagnetycznych. Szczególnie, technologie wykorzystujące siłowe oddziaływanie pola elektrycznego na cząstki naładowane. Technologie te znajdują zastosowanie w oczyszczaniu gazów kominowych z popiołu, w malowaniu elektrycznym oraz powlekanii powierzchni powłokami proszkowymi opartymi na kompozytach polimerowych. Znajdują zastosowanie również w procesach elektrografii, separacji materiałów zawierających frakcje dyspergowane, we wzbogacaniu rudy, itp. Udoskonalenie technologii elektro-nowo-jonowych pozwoliło na zastosowanie elektrycznych metod separacji, wykorzystujących różnice między właściwościami składników materiałów wyjściowych w zakresie przewodnictwa elektrycznego i przenikalności dielektrycznej na skalę przemysłową [1-5]. Ponadto, separacja elektryczna nie wymaga wykorzystania wody. Nie ma potrzeby oczyszczania ścieków. Separacja elektryczna charakteryzuje się najniższym stopniem zapylenia powietrza, ponieważ pył jest zatrzymywany w separatorze siłami pola elektrycznego.

W związku z rozwojem metalurgii proszków i szerokim zastosowaniem cząstek o pewnych wymiarach w przemyśle chemicznym, elektrotechnicznym i innych branżach sucha separacja drobno sproszkowanych materiałów o wymiarach mikronowych i submikronowych jest aktualnie ważnym zadaniem [1, 6]. Z punktu widzenia wytworzenia źródeł zasilania o dużej efektywności jak i samych superkondensatorów ważne jest przejście do cząstek submikronowych, a nawet cząstek o nanowymiarach [7, 8]. Jednak materiały proszkowe o dużym stopniu rozproszenia [7, 8] powstały dzięki syntezie chemicznej, dlatego rozmiary powstałych cząstek są bardzo różne (od najmniejszych, atomowych do największych w skali makroskopowej). W przemyśle w celu obniżenia kosztów produkcji i zwiększenia ekologiczności sensownym wydaje się otrzymanie proszków o dużym stopniu rozproszenia. Powstałe w syntezie makroproszki rozdrabniać i rozdzielać na frakcję o wymiarach niezbędnych do rozwiązania konkretnego zadania.

Z wyżej wymienionych powodów celem niniejszej rozprawy było otrzymanie węgla aktywnego z surowca roślinnego, wytworzenie elektroseparatora do rozdzielania węgla na frakcje oraz określenie pojemności właściwej węgla każdej frakcji jako materiału do produkcji elektrod superkondensatorów.

### Metoda przygotowania próbek i przeprowadzenia badań

Jako surowiec wejściowy pirolizy wykorzystano wióry brzożowe. Wióry najpierw mechanicznie rozdrobiono do rozmiaru 5-10 mm a następnie przemywano wodą destylowaną w temperaturze pokojowej. Przemywano do czasu uzyskania czystej wody odpływowej. Czystość wody była określana wizualnie. Później wióry wysuszono w suszarce szafkowej powietrzem o temperaturze 100 - 110 C do uzyskania suchej masy. Do pirolizy wykorzystano tygiel stalowy, który umieszczono w reaktorze rurowym. Zarówno tygiel, jak i reaktor wykonane były ze stali nierdzewnej typu X18H10T. Aktywacja odbyła się za pomocą pary wodnej, której nośnikiem był argon. Czas aktywacji wynosił 2 godziny w temperaturze 800 ± 5 C. Otrzymany węgiel aktywny przemyto wodą destylowaną i wysuszono.

W celu przeprowadzenia badań węgiel został mechanicznie rozdrobiony w młynie kulowym i przesiany w maszynie przesiewającej przez zestaw. Najmniejszy rozmiar otworu sita wynosił 40μm. Frakcja otrzymana z przesiewaniu przez to sito była wykorzystywana jako materiał wyjściowy do dalszego rozdzielania na kolejne frakcje za pomocą zbudowanego przez nas separatora. Wszystkie większe frakcje poddawano ponownemu zmieleniu.

Zdjęć oddzielnego węgla dokonywano za pomocą rastrowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w komorę niskopróżniową i system mikroanalizy energodispersyjnej REM-10. Mikroskop ten przeznaczony jest do bezpośredniego badania ukształtowania powierzchni różnych materiałów w fazie stałej i określenia ich składu pierwiastkowego metodą mikroanalizy rentgenowskiej według energii kwantów charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego w trybie próżni niskiej i wysokiej.

Do produkcji elektrod superkondensatorów opartych na warstwie kondensatorów wykorzystano wszystkie frakcje. Do produkcji elektrod jako składnik wiążący wykorzystano

polifluorek winylidenu (Sigma-Aldrich), w którym stosunek węgla aktywnego do wiążącego wynosił 19:1. Jako elektrolit w superkondensatorach wykorzystano 30 % roztwór wodny KOH (Merck). Pojemność właściwą obliczono na podstawie pomiaru galwanostatycznego ładowania-rozładowania superkondensatorów według wzoru:

$$(1) \quad C = \frac{2I \cdot t}{U \cdot m}$$

gdzie  $I$  – natężenie prądu rozładowania,  $t$  – czas rozładowania,  $U$  – spadek napięcia rozładowania,  $m$  – masa mniejszej elektrody superkondensatora. W miarę możliwości należy stosować elektrody o jednakowej masie.

### **Analiza zachowania się proszku w separatorze tryboelektrycznym**

Tradycyjny separator tryboelektryczny zwykle składa się z trzech części – strefa podawania materiału, strefa ładowania i strefa sortowania. Jednak proces ładowania cząstek proszku jest kluczowym czynnikiem pracy separatora. W celu rozdzielania cząstek węgla aktywnego według rozmiaru wybrano metodę tryboelektryczną. Wyboru dokonano po przeanalizowaniu literatury [1, 9-11]. Separator był bębnowy. Analiza tryboelektrycznej metody separacji wykazała możliwość skutecznego stosowania ładunków powstających z tarcia i sił międzycząsteczkowych do rozdzielania materiałów o dużym stopniu rozproszenia zarówno według rozmiarów cząstek, jak i składu substancji.

Regulując wielkość siły adhezji, właściwości separacyjne proszków rozdzielanych można zmieniać w szerokim zakresie. Składowa elektryczna siły adhezji cząstek proszku ma decydujące znaczenie. Zmian jej wielkości dokonywać można zwiększając stopień naelektryzowania tych cząstek. Można to osiągnąć poprzez zmianę ich właściwości elektrofizycznych, składu powierzchni cząstek, liczby kontaktów i amplitudy drgań oraz innych czynników.

Składowa elektryczna siły adhezji stanowi sumę sił oddziaływania uwarunkowanego podwójną warstwą elektryczną powstającą w miejscu kontaktu a siłą oddziaływania ładunku cząstki z materiałem podłoża. Powstanie tego ładunku jest związane z wcześniejszym naelektryzowaniem cząstek. Ładunki cząstek mogą powstawać wskutek zderzenia zarówno materiałów różnorodnych, jak i jednorodnych. Siły elektryczne uwarunkowane odbiciem zwierciadlanym są znacznie większe niż siły molekularne i siły oddziaływania podwójnej warstwy elektrycznej [10]. Dlatego to właśnie one głównie decydują o siłach adhezji w separacji tryboelektrycznej. Oddziaływanie wzajemne cząstek naładowanych z powierzchnią podłoża ujawnia się szczególnie silnie w chwili początkowej ich kontaktu z powierzchnią. Czas oddziaływania odbicia zwierciadlanego zależy od powierzchniowych właściwości ciał stychnych, środowiska (wilgotność, temperatura), rozmiaru cząstek. Jeśli powierzchnia jest nieuziemiaona lub nieprzewodząca oraz prawdopodobieństwo odpływu ładunku jest niskie (na przykład, wskutek jonizacji powietrza), wtedy siły odbicia zwierciadlanego mogą dokonywać adhezji cząstek przez dłuższy czas [12]. W separatorach tryboelektrycznych uzasadnione jest uziemienie powierzchni bębna i rynny doprowadzającej materiał. Jednak są zawsze najcieńsza warstwą proszku, który jest poddawany separacji, czy warstwa utlenionego metalu pokrywa powierzchnię, co utrudnia odpływ tryboładunku cząstek. Ponieważ te ostatnie znajdują się na bębnie mniej niż przez 1 s (gdy średnica bębna wynosi 300 mm, optymalna prędkość obrotowa to około 1 m/s [9, 12]), jest oczywiste, że wartość odbicia zwierciadlanego jest znaczącą i jego oddziaływanie trwa przez ten okres.

Obliczenie ładunku cząstek jest skomplikowane, ponieważ ładunek zależy od takich czynników jak skład granulometryczny i kształt cząstek, należy również uwzględnić ich wilgotność, stopień zanieczyszczenia powierzchni cząstek przez substancje obce czy absorbowane atomy gazu, itp. [10, 13, 14]. W cząstkach metali wartość ładunku zwiększa się proporcjonalnie do kwadratu ich promienia. Reguły tej nie można zastosować dla cząstek półprzewodników i dielektryków, które w zasadzie charakteryzują się dowolnym kształtem. W związku z tym dla cząstek węgla wartość ładunku jest określana głównie w drodze badań doświadczalnych [11].

Wilgotność materiału także ma istotny wpływ na wartość ładunku. Zwykle separację przeprowadza się przy wilgotności względnej 55-60% [10]. W przypadku większej wilgotności cząstki pokrywają się warstwą wody, co zapobiega możliwości zwiększenia ładunku wskutek kontaktu. Dlatego siła adhezji wzrasta kosztem sił kapilarnych, które powodują zmniejszenie sypkości materiału. Ładowanie takich materiałów nie przebiega identycznie.

Duży wpływ na wartość ładunku ma stopień zanieczyszczenia powierzchni cząstek. W tym przypadku ładowanie jest możliwe wskutek oddziaływania substancji powierzchniowo czynnych, które powodują zmiany właściwości fizykochemicznych materiałów oraz wskutek zmiany mechanizmu ładowania. W celu zwiększenia ładunku cząstek i skutecznego rozdzielania proszków o dużym stopniu rozproszenia zgodnie z danymi przytoczonymi w literaturze [12] przed rozdzieleniem materiał należy nagrzać do całkowitego wysuszenia.

Zwiększeniu wartości tryboładunku, oprócz nagrzewania proszków, sprzyja również zastosowanie wibracji podczas przemieszczenia cząstek wzdłuż rynny doprowadzającej materiał. Towarzyszy temu zwiększenie liczby kontaktów cząstek z twardą powierzchnią. Wiadomo, że tryboładunki tworzone na cząstkach podczas rozpylania, tarcia czy uderzenia w twardą powierzchnię osiągają znaczne wielkości [15] (dla cząstek dielektryków o średnicy 114  $\mu$ , rynny o długości 80 cm, ładunek sięga 3  $10^{-1}$  C/g). Wielkość ładunku powstającego w cząstkach proszku podczas przemieszczenia wzdłuż rynny zależy od prędkości ich przemieszczania i amplitudy drgań rynny.

Ta ostatnia jest regulowana za pomocą napięcia doprowadzonego do elektromagnesu wibratora oraz otworu między twornikiem cewki wibratora a powierzchnią dolną rynny. Kąt nachylenia rynny do poziomu wynosi 30-35° [15]. Przy większej amplitudzie drgań (od 1 do 8 mm) wartość ładunku cząstek różnego rozmiaru zwiększa się do pewnego stopnia, a następnie praktycznie się nie zmienia. Ustalono, że w razie intensywnych drgań oddzielne cząstki nie przemieszczają się wzdłuż powierzchni rynny, co więcej, zawisają w powietrzu przez większą część cyklu wibracji. To zapewnia wysoką prędkość oderwania cząstek od powierzchni rynny i dużą siłę uderzenia podczas ich dalszego zderzenia z rynną. Zwiększenie ładunku cząstki podczas uderzenia w twardą powierzchnię jest możliwe także wskutek zwiększenia powierzchni kontaktu i zniszczenia błon powierzchniowych. To wszystko pozwala zapewnić wartość tryboładunków wystarczającą dla przeprowadzenia separacji.

Wcześniejsze badania [16] wykazały, że zwiększenie prędkości oderwania (wskutek zmiany amplitudy drgań) i liczby kontaktów powoduje zwiększenie tryboładunków cząstek węgla aktywnego. Jednocześnie okazało się, że ładunki drobnych cząstek są większe, niż ładunki wielkich, ponieważ przy jednakowej długości rynny wibracyjnej liczba kontaktów drobnych cząstek z powierzchnią rynny była większa. Zwiększeniu ładunku

towarzyszy zwiększenie siły adhezji drobnych cząstek, gdyż one dobrze utrzymują się na powierzchni bębna separatora. Upřednie ładowanie cząstek za pomocą rynny wibracyjnej powoduje trzykrotne zwiększenie uzysku wybranej frakcji, w porównaniu z uzyskiem cząstek ładowanych wzajemnym tarcieniem lub tarcieniem o rynnę. Dodatkowo zwiększeniem o pięć - siedem razy w porównaniu z uzyskiem cząstek nienaładowanych, przekazywanych z zasobnika bezpośrednio do bębna. Materiał rynny ma duży wpływ na ładowanie cząstek. Przeprowadziliśmy badania podłoża rynny z aluminium, stali nierdzewnej i tworzywa sztucznego. Najlepsze wyniki przyniosło zastosowanie aluminium. Stosowanie podłoża rynny z materiałów nieprzewodzących jest niezalecane, ponieważ tarcie oddzielonych cząstek o taki materiał wywołuje znaczny ładunek statyczny naruszający stabilność ładunku cząstek.

W celu eliminacji zewnętrznych wpływów elektrycznych na tryboładowanie cząstek i zapewnienia jednobiegunowości ich ładunków powierzchnia rynny jest uziemiana. Należy zaznaczyć, że cząstki o jednobiegunowych ładunkach nie skleją się, co polepsza warunki ich separacji.

Wartość ładunku cząstek także zależy od ich rozmiaru i kształtu. Cząstki o dużym stopniu rozproszenia i rozwiniętej powierzchni, zwłaszcza mniejsze niż  $40 \mu\text{m}$ , posiadają większy ładunek, niż duże cząstki. Kształt cząstki wpływa na jej powierzchnię kontaktu z podłożem. Zdjęcia elektronowe naszego węgla wykazały, że cząstki te mają nieregularne kształty, a więc mają większą powierzchnię kontaktu podczas zderzenia z podłożem, niż cząstki okrągłe. Należy ten fakt także uwzględnić w analizie systemu „cząstka - bęben”, ponieważ zgodnie z wyliczeniami [12] uzysk zatrzymywanej frakcji jest prawie o półtora raza większy. Ustalono, że dla cząstek o jednakowej masie i różnych kształtach wartość maksymalnego właściwego ładunku cząstek o niesferycznym kształcie jest o półtora - dwa razy większa, niż dla cząstek o sferycznym kształcie. Ta różnica jest szczególnie zauważalna w cząstkach o wymiarach do  $200 \mu\text{m}$ ; w większych cząstkach różnica się zmniejsza.

### Badania i dyskusja rezultatów

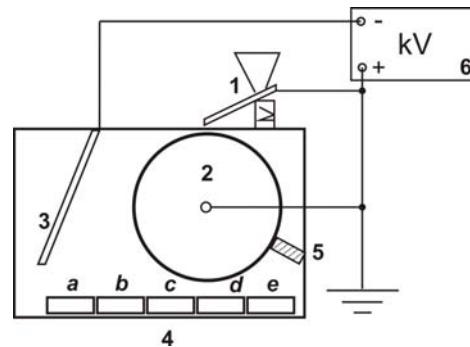
Po przeanalizowaniu danych [10, 12, 14, 15], uwzględniając własne eksperymenty [16] i cechy separatorów [17, 18] oraz posiadając główne charakterystyki syntezowanego i badanego przez nas węgla zbudowaliśmy tryboelektryczny separator bębnowy z bębniem o średnicy 280 mm. Prędkość obrotowa bębna wynosiła 60 – 70 obr/min, co zapewniało prędkość ruchu powierzchni około 1 m/s. Cząstki węgla znajdowały się na powierzchni mniej niż 1 s, więc wartość oddziaływania elektrostatycznego wskutek wycieku ładunku znacznie się nie zmieniała.

Doprowadzanie cząstek do bębna było dokonywane za pomocą rynny wibracyjnej zainstalowanej pod kątem  $35^\circ$  do poziomu. Rynna wykonana była z aluminium. Ponieważ wartość ładunku cząstek była nieznana, do sterowania torem lotu cząstek wykorzystano zewnętrzne pole elektryczne. W tym celu w konstrukcji separatora zamontowano elektrodę metalową. Dzięki zastosowaniu bloku zasilania wysokonapięciowego pomiędzy tą elektrodą a powierzchnią bębna powstawało pole zewnętrzne.

Schemat separatora zbudowanego na podstawie wyżej wymienionych badań przedstawiono na rys.1.

Rozdrobniony proszek węgla aktywnego był zasypywany przez lejek, z którego przez zasuwę dostawał się do rynny wibracyjnej 1. Przemieszczając się wzdłuż rynny, proszek ładował się i docierał do bębna 2. Bęben obracał się i proszek obracał razem z nim, ponieważ

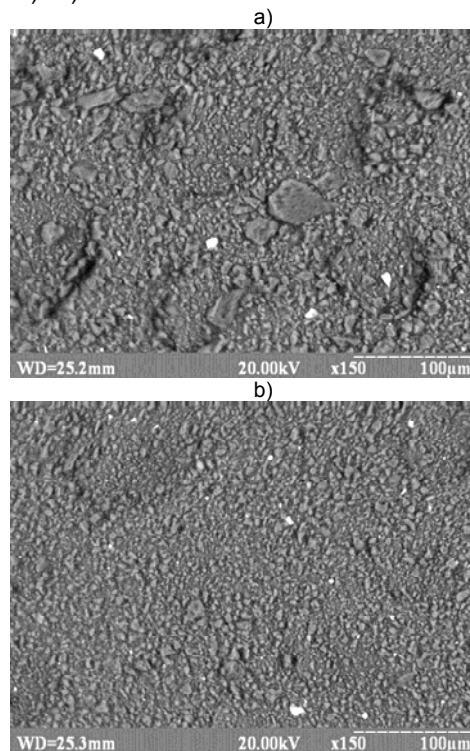
utrzymywał się elektrostatyczną siłą adhezji. W celu oderwania proszku od bębna do bieguna ujemnego źródła wysokiego napięcia 6 podłączano elektrodę 3. Biegun dodatni był uziemiony i podłączony do bębna. Po rozdeleniu węgla frakcje trafiały do korytek 4a, 4b, 4c, 4d, 4e. Do oczyszczania bębna wykorzystywano szczotkę 5.



Rys.1. Schemat instalacji separacji proszkowego materiału węglowego.

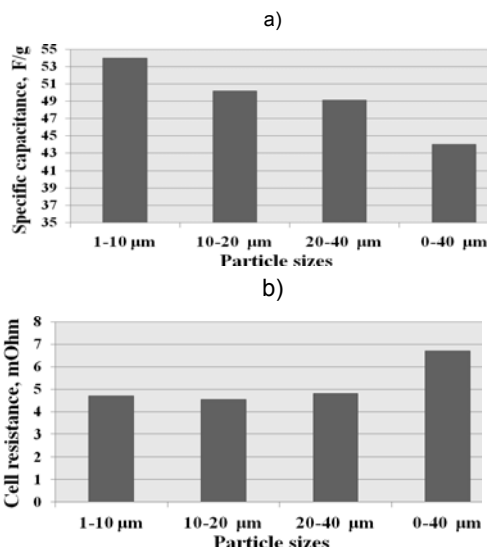
Eksperymentalnie ustalono, że bez zewnętrznego pola cząstki węgla nie trafiają do korytka 4a. Żeby trafiały do tego korytka, do elektrody 3 został doprowadzony potencjał ujemny, ponieważ zgodnie z danymi [11, 16] cząstki węgla przy ładowaniu tryboelektrycznym mają ładunek dodatni. Ustalono, że cząstki węgla zaczynają trafiać do korytka 4a gdy natężenie pola wynosi  $38 \text{ kV/m}$ .

Skład frakcyjny został określony za pomocą mikroskopu elektronowego. Otrzymane zdjęcia węgla wyjściowego i frakcji o orientacyjnych wymiarach 1-10  $\mu\text{m}$  przedstawiono na rys.2 a) i b).



Rys. 2. Zdjęcia wydzielonych frakcji materiału węglowego. a) węgiel wyjściowy, b) frakcja 1-10  $\mu\text{m}$ .

Z każdej wydzielonej frakcji węgla wyprodukowano superkondensatory, dla których na podstawie wzoru (1) po przeprowadzeniu badania galwanostatycznych cykli ładowania-rozładowania określono wartość średnią pojemności właściwej materiału. Otrzymany wykres jest przedstawiony na rys.3a).



Rys.3. Zależność pojemności właściwej węgla aktywnego (a) i oporu wyprodukowanych z niego superkondensatorów (b) od składu frakcyjnego.

Z przedstawionego wykresu widzimy, że największą pojemnością właściwą charakteryzuje się materiał o wymiarach cząstek 1-10 μm. W takim węglu w porównaniu z węglem wyjściowym wymieniony parametr zwiększa się o około 25%. Jest to uwarunkowane, przez lepsze warunki ruchu jonów elektrolitu [8] – w mniejszych cząstkach pory mają mniejszą długość, co sprzyja lepszej adsorpcji i migracji. W literaturze wykazano, że obok zwiększenia pojemności zmniejsza się także opór elektrody superkondensatora [8]. Przeprowadzone badania oporu superkondensatorów pokazuje rys.3b). Widać, że dla wszystkich wydzielonych frakcji opór elektrod jest mniej więcej jednakowy. Jest o około 30% mniejszy niż opór elektrod z węgla wyjściowego. Więc lepsze kontakty między cząstkami o wymiarach zbliżonych do monodispersyjnych mają decydujące znaczenie dla zmniejszenia oporu.

## Wnioski

1. Została opracowana konstrukcja i zbudowana instalacja powietrznej separacji tryboelektrycznej z separatorem bębnowym. Średnica bębna wynosi 280 mm. Prędkość obrotowa bębna 60-70 obr/min. Prędkość ruchu powierzchni bębna wynosi około 1 m/s. W celu zwiększenia skuteczności separacji została zamontowana dodatkowa elektroda, do której był dostarczany potencjał ujemny od bloku zasilania wysokonapięciowego. Korytka do zbierania frakcji pozwalają otrzymywać różne frakcje oddzielonego materiału przy natężeniu pola „elektroda – bęben” wynoszącym 38 kV/m.

2. W drodze eksperymentu ustalono, że istotny wpływ na wartość tryboładunku ma zastosowanie wibracji. Uzysk określonej frakcji w przypadku uprzedniego ładowania cząstek za pomocą rynn wibracyjnej jest 3 razy większy niż uzysk cząstek ładowanych wzajemnym tarcieniem czy tarciem o rynnę oraz 5 - 7 razy większy niż uzysk cząstek nienaładowanych przemieszczających ze zbiornika bezpośrednio do bębna. Materiał rynnny ma istotny wpływ na ładowanie cząstek. W drodze przeprowadzenia badań materiałów ustalono, że najlepsze wyniki przynosi zastosowanie aluminium.

3. Udowodniono, że obróbka cieplna proszków ma istotny wpływ na wartość ich tryboładunków. W celu skutecznego rozdzielania materiałów węglowych o dużym stopniu rozproszenia należy przeprowadzić ich uprzednie

przygotowanie za pomocą suszenia w temperaturze 100 – 120 °C do osiągnięcia masy stałej węgla.

4. Z otrzymanych frakcji zostały wyprodukowane superkondensatory i określona ich pojemność właściwa. Ustalono, że największą pojemność ma materiał z cząstkami o wymiarach 1-10 μm. W takim węglu wymieniony parametr jest o około 25% większy niż w węglu wyjściowym, jednocześnie opór elektrod jest o około 30% mniejszy.

**Autorzy:** mgr Piotr Chabecki, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: piotr.chabecki@el.pcz.czest.pl; dr Ihor Bordun, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: bordun.igor@gmail.com; dr inż. Fedir Ivashchynshyn, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: fedirivashchynshyn@gmail.com

## LITERATURA

- [1] Higashiyama Y., Asano K., Recent progress in electrostatic separation technology, *Particulate Science and Technology*, 16 (2007), nr.1, 77-90
- [2] Manouchehri H., Hanumantha Rao, Forssberg K., Review of electrical separation methods. – Part 1: Fundamental aspects., *Minerals&Metallurgical Processing*, 17 (2000), nr.1, 23-36
- [3] Messal S., Corondan R., Chetan I., Ouiddir R., Medles K., Dascalescu L., Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment, *J. Physics*, 646 (2015), 1-4
- [4] Rajaanarivony R.K., Rouau X., Dascalescu L., Mayer-Laigle C., Electrostatic separation of mineral and vegetal powders with a custom built corona separator: application to biorefinery of rice husk, *EPJ Web of Conferences "8th International Conference on Micromechanics on Granular Media Powders&Grains 2017"*, 140 (2017), article number 13020, 1-4
- [5] Cieśla A., Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.12, 65-68
- [6] Zyrjanov V.V., Dry methods for obtaining and separating powders using mechanical operations, *Nauka – proizvodstvo*, (2002), nr.2, 52-57
- [7] Jayalakshmi M., Mohan Rao M., Kwang-Bum Kim, Effect of Particle Size on the Electrochemical Capacitance of α-Ni(OH)<sub>2</sub> in Alkali Solutions, *Int. J. Electrochem. Sci.*, (2006), nr.1, 324-333
- [8] Portet C., Yushin G., Gogotsi Y., Effect of Carbon Particle Size on Electrochemical Performance of EDLC, *J. Electrochem. Soc.*, 155 (2008), nr.7, A531-A536
- [9] Barsky E., Conditions providing optimum separation, *Physical Separation in Sci. and Eng.*, 13 (2004), nr.3-4, 153-163
- [10] Physical basis of electrical separation, Revnivcev V.I., Ed., Moscow, Nedra, 1983
- [11] Cieśla A., Skowron M., Syrek P., Elektryzacja ziaren węgla metodą tryboelektryczną, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr.1, 129-132
- [12] Olofinsky N.F., Novikova V.A., Belov V.I., Electro-classification of fine materials, in *Theoretical bases and practice of electroseparation of finely divided materials*, Moscow, Nauka, 1974, 17-39
- [13] Ireland P.M., Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode, *Journal of Electrostatics.*, 70 (2012), nr.6, 524-531
- [14] Lindley K.S., Rowson N.A., Charging Mechanisms for Particles Prior to Electrostatic Separation, *Magn. and electrical separ.*, 8 (1997), nr.2, 101-114
- [15] Barsky M.D., Fractionation of powders, Moscow, Nedra, 1980
- [16] Bordun I.M., Pondor I.S., Fractionation of carbon fine powders by tribo-electrostatic separation method, *Proc. sci-tech. conf. "Physic, electronic, electrotechnic PEE-12"*, (2012), 133
- [17] Romanov A.I., Garibov G.S., Kasastkin V.V., Patent 2348468 RU, (2009)
- [18] Eiderman B., Levi H., Voskoboinik M., Patent 6439394 US, (2002)