

WYKORZYSTANIE WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH ZIARNIAKÓW PSZENICY I ICH FRAKCJI PRZEMIAŁOWYCH W ELEKTROTECHNOLOGIACH

Andrzej Sumorek, Marek Horyński, Wiktor Pietrzyk

Wydział Elektryczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
e-mail: sumek@elektron.pol.lublin.pl

Streszczenie. Artykuł zawiera wyniki pomiarów wybranych parametrów elektrycznych ziarniaków i pyłów otrzymanych z ich przemiału. Pomiary dotyczą wielkości takich, jak: rezystywność, składowa rzeczywista i urojona przenikalności elektrycznej. Podano również wyniki badań nowych elektrotechnologii opracowanych w Katedrze, tj.: suszenia konwekcyjnego pszenicy w obecności pola elektrycznego i wiatru jonowego oraz odpylania za pomocą filtrów bifilarnych. W badanym zakresie, przy minimalnej stosowanej prędkości strumienia powietrza i maksymalnym natężeniu pola elektrycznego, udało się osiągnąć nawet 37% wartość współczynnika oszczędności energii. Wyniki badania filtrów bifilarnych wskazują na możliwość uzyskania poprawy skuteczności odpylania od 5 do 11% w porównaniu z filtrami tkaninowymi.

Słowa kluczowe: właściwości elektryczne ziarniaków, wiatr jonowy, elektrofiltr bifilarny

WSTĘP

Obok tradycyjnego, pośredniego wykorzystania energii elektrycznej w rolnictwie (napęd elektryczny, oświetlenie, ogrzewanie) istnieje możliwość bezpośredniego wykorzystania tej energii do znanych procesów konwencjonalnych. Prowadzi to często do podniesienia sprawności, obniżenia energochłonności oraz zmian jakościowych procesu. Bezpośrednie wykorzystanie energii elektrycznej w procesie wytwórczym nosi zwyczajowo nazwę elektrotechnologii. Ich wprowadzenie wymaga gruntownego poznania właściwości fizycznych, w tym elektrycznych, obrabianego medium.

W pierwszej części pracy przedstawiono wyniki badań procesu suszenia konwekcyjnego pszenicy z udziałem stałego pola elektrycznego i wiatru jonowego.

Ta jakościowo nowa technologia pozwoliła na prawie 40% obniżenie energochłonności i znaczne skrócenie czasu suszenia w warunkach laboratoryjnych.

W drugiej części zaprezentowano sposób odpylania za pomocą opracowanego elektrofiltru bifilarnego. Konstrukcja i zasada działania umożliwia zastosowanie go w środowisku pyłów wybuchowych (młyny, kaszarnie, mieszalnie pasz itp.). Osiągnięte wyniki skuteczności odpylania są porównywalne z elektrofiltrami wyładowczymi, które mogą pracować tylko w środowisku niepalnym (np. pyły z kotłów węglowych). Brak poboru energii elektrycznej przez uzwojenie, pozwala uzyskiwać małą energochłonność.

Praca poprzedzona jest wynikami badań wybranych parametrów elektrycznych ziarniaków zbóż i ich frakcji przemiałowych, opisujących ich właściwości elektryczne.

WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE ZIARNIAKÓW ZBÓŻ

Ziarniaki zbóż należą do grupy dielektryków o budowie niejednorodnej i słabej polaryzowalności [6]. Do najważniejszych parametrów elektrycznych ziarniaków należą: rezystywność, przenikalność elektryczna, tangens kąta stratności.

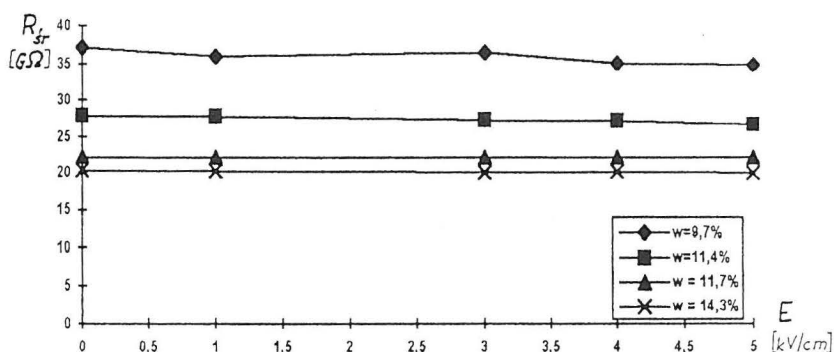
Parametry te zależą od wielu takich czynników, jak: gatunek zboża, budowa wewnętrzna ziarniaka, wilgotność, temperatura, częstotliwość pola elektrycznego.

Rezystancja ziarniaków zbóż zależy od wielu czynników, m.in.:

- temperatury,
- wilgotności,
- natężenia pola elektrycznego,
- częstotliwości pola elektrycznego.

Rezystancja ziarniaków maleje przy wzroście temperatury, podobnie jak w ciałach będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników. Rezystancja ziarniaków zbóż zależy silnie od wilgotności - wraz ze wzrostem wilgotności maleje.

Rezystancja ziarniaków maleje także wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego [1,6]. Szczególnie jest to widoczne przy wyższych wilgotnościach; wtedy ziarniaki nabierają właściwości półprzewodników. Można to wytłumaczyć pojawieniem się w ziarnie, w miarę wzrostu natężenia pola, prądu elektrycznego. Efekt ten został zaobserwowany szczególnie przy wyższych wilgotnościach ($w_{\%} \geq 15\%$). Przy większych wilgotnościach ($w_{\%} \geq 20\%$) ziarniaki nabierają właściwości ciał z pogranicza dielektryków i półprzewodników.

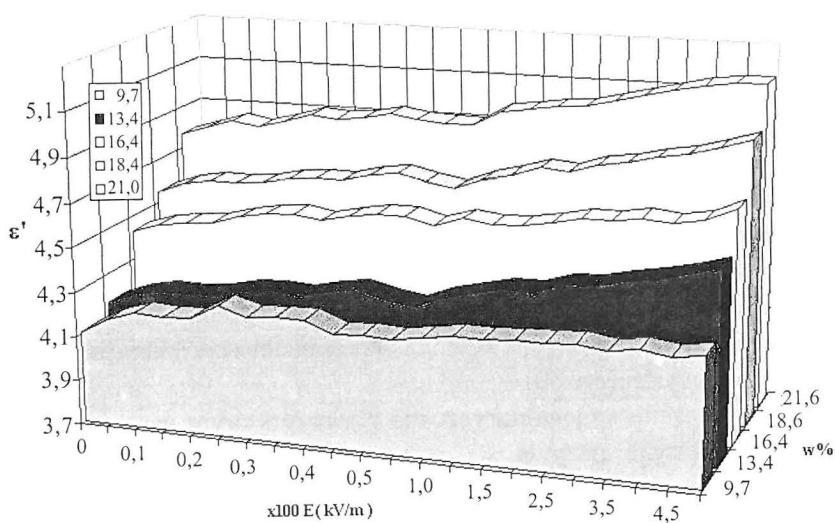


Rys. 1. Zależność rezystancji ziarniaka od natężenia pola elektrostatycznego [1]

Fig. 1. The dependence of grain resistance on electrostatic field intensity [1]

Przenikalność elektryczna ziarniaków zbóż jest wielkością zespoloną [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (1)$$



Rys. 2. Zależność składowej rzeczywistej przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta od wilgotności i natężenia pola elektrostatycznego $\varepsilon' = f(E, w_{\%})$

Fig. 2. The dependence of real part of permeability, moisture and electric field intensity $\varepsilon' = f(E, w_{\%})$ for rye grain

Część rzeczywista zespolonej względnej stałej dielektrycznej – ε' wskazuje na zdolność do magazynowania energii w materiale umieszczonym w polu elektrycznym. Jest również ważnym czynnikiem przy określaniu wartości natężenia pola elektrycznego przy projektowaniu i stosowaniu urządzeń do mikrofalowego suszenia i niszczenia insektów w nasionach zbóż.

Składowe ε zależą silnie od wilgotności i częstotliwości pola. Składowa rzeczywista i urojona wzrastają wraz ze wzrostem wilgotności, co jest związane z dużą przenikalnością elektryczną wody.

Składowa rzeczywista ε' maleje w funkcji częstotliwości pola, co wiąże się z zanikiem niektórych mechanizmów polaryzacji. Zależność ta jest przedziałami liniowa. Przykładowo w temperaturze 50°C można zaobserwować liniowy spadek tej składowej dla ziarniaków pszenicy, dla częstotliwości $f > 10^6$ Hz.

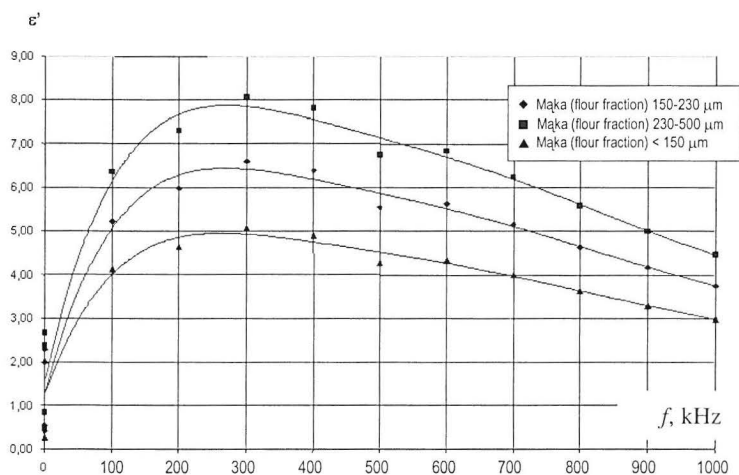
WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE PYŁÓW POCHODZENIA ZBOŻOWEGO

W procesie odpylania istotna jest znajomość następujących właściwości elektrycznych pyłu [13]: rezystywności, przenikalności elektrycznej, wytrzymałości na przebicie warstwy pyłu oraz charakterystyk prądowo-napięciowych. Aby prawidłowo dobrać warunki pracy elektrofiltru, konieczna jest znajomość przebiegu charakterystyki rezystywności pyłu $\rho = f(T, w\%)$, który ma być strącany. Rezystywność pyłu zależy od: temperatury (T), wilgotności ($w\%$), rodzaju ośrodka gazowego wypełniającego przestrzeń między cząstkami. Składowa rzeczywista przenikalności elektrycznej pyłu wskazuje na zdolność do magazynowania w nim energii pola elektrycznego.

Analiza przeprowadzonych pomiarów wykazuje, że przenikalność elektryczna zmienia się wraz z częstotliwością napięcia. Składowa rzeczywista przenikalności elektrycznej pyłu rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości i osiąga maksimum przy częstotliwości $f \approx 300$ kHz, po przekroczeniu którego ma charakter liniowy – malejący (rys. 3). Składowa urojona zespolonej przenikalności elektrycznej maleje ze wzrostem częstotliwości (rys. 4).

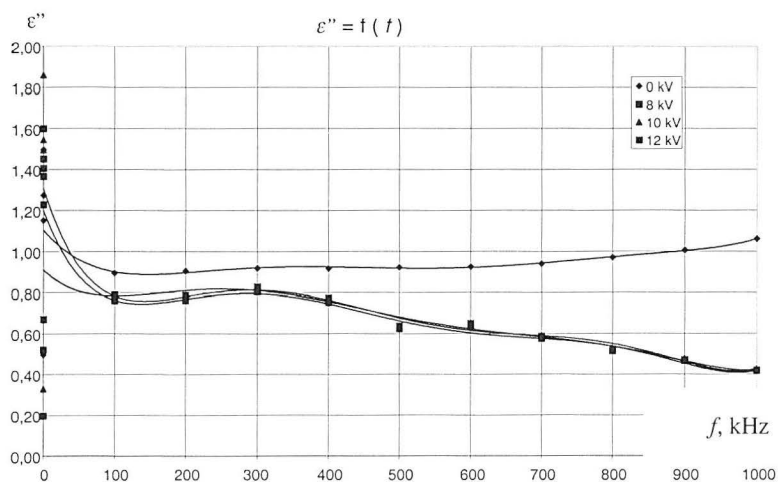
Krytyczne natężenie pola elektrycznego E_p , przy którym następuje przebicie elektryczne dielektryka nazywa się wytrzymałością elektryczną dielektryka. Przebicie warstwy pyłu następuje wtedy, gdy natężenie warstwy przekracza jej wytrzymałość elektryczną. Po przekroczeniu wytrzymałości warstwy pyłu na przebicie, następuje częściowe przebicie jej i przez obwód płynie prąd o dużym natężeniu. Prąd ten wzrasta w miarę zwiększania napięcia i wreszcie, po powstaniu wstecznego ulotu, prąd osiąga wartość przekraczającą wartość dla czystej elektrody. Z przebiegu krzywych charakterystyki prądowo napięciowej można

rozpoznać pojawienie się wstępnego ulotu. Przy dobrze przewodzących pyłach nie pojawia się wstępny ulot.



Rys. 3. Wykres składowej rzeczywistej przenikalności badanych frakcji mąki pszennej ($U = 12$ kV)

Fig. 3. Real part of dielectric permeability for wheat flour fraction ($U = 12$ kV)



Rys. 4. Wykres składowej urojonej przenikalności elektrycznej mąki pszennej dla frakcji < 150 μm

Fig. 4. Imaginary part of dielectric permeability for wheat flour fraction < 150 μm

SUSZENIE KONWEKCYJNE PSZENICY W OBECNOŚCI POLA ELEKTRYCZNEGO I WIATRU JONOWEGO

O zmianie przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego mogą decydować siły elektrostrykcyjne, usiłujące zdeformować pierwotną strukturę dielektryka niejednorodnego poprzez ściskanie lub rozciąganie poszczególnych warstw. Deformacja z kolei prowadzi do zmiany gęstości dielektryka, co jest bezpośrednią przyczyną zmian jego przenikalności dielektrycznej. Na podstawie zależności (2) możliwe jest wyznaczenie gęstości objętościowej sił elektrostrykcji f_e [5,16]:

$$f_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \operatorname{grad} \left(E^2 \rho \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial \rho} \right), \quad (2)$$

gdzie: f_e – gęstość objętościowa sił elektrostrykcji, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$,

E – natężenie pola elektrycznego, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$,

ε_0 – przenikalność dielektryczna próżni, $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$,

ε_r – przenikalność elektryczna względna,

ρ – masa właściwa, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Taruszkin [21], podejmując próbę wyjaśnienia fizyki zjawiska elektrostrykcji w ziarniaku i określenia rodzaju sił elektrostrykcyjnych, stwierdził, że siły elektrostrykcyjne powodują ściskanie jednych warstw a rozciąganie innych. Wielkość siły elektrostrykcyjnej zależy od przenikalności elektrycznej poszczególnych warstw ziarniaka. Ściskanie i rozciąganie warstw ziarniaka prowadzi do zmiany zdolności do zatrzymywania wilgoci.

Przy badaniu zagadnień opisujących wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła w konwekcji swobodnej powstały dwa charakterystyczne układy. W pierwszym, źródłem pola termicznego i elektrycznego są te same elementy układu, przez które przepływa prąd elektryczny [3,7,14,19]. W drugim, źródło ciepła jest odseparowane od źródła pola elektrycznego. Na podstawie analizy numerycznej procesu wymiany ciepła pomiędzy płaszczyznami wnioskowano o możliwości zwiększenia intensywności wymiany ciepła [9,15].

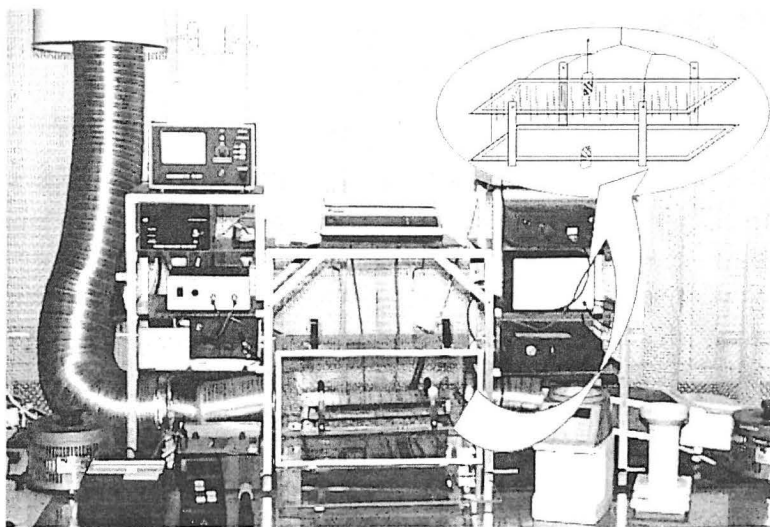
Wyniki badań wpływu pola elektrycznego na zjawiska towarzyszące konwekcyjnemu usuwania wody z powierzchni ciał płaskich i o kształcie walcowym można znaleźć w pracach Sadka i Wolnego [18,22]. Stanowiska badawcze były tak skonstruowane, że z góry stworzono warunki do występowania wyładowań niezupełnych. Dodatkowo oprócz napięcia pomiędzy elektrodami mierzony był prąd

ulotu. Siła F_c intensyfikująca przebieg procesu suszenia, pochodząca od wiatru jonowego, opisywana jest przez tych autorów równaniem:

$$F_c = \alpha_k \varepsilon A \left(\frac{V - V_o}{a} \right)^2, \quad (3)$$

gdzie: F_c – siła intensyfikacji o źródle w postaci wiatru jonowego, N,
 α_k – współczynnik układu elektrod ($\alpha_k = 8/9$ dla elektrod równoległych),
 ε – przenikalność elektryczna powietrza, $F \cdot m^{-1}$,
 A – powierzchnia elektrody płaskiej, m^2 ,
 V – napięcie pomiędzy elektrodami, V,
 V_o – napięcie progowe ulotu, V,
 a – odległość pomiędzy elektrodami, m.

Bazując na teoretycznych informacjach dotyczących możliwości przyspieszenia za pomocą pola elektrycznego przebiegu wymiany ciepła i masy w suszonym obiekcie, podjęto próbę praktycznej weryfikacji tej hipotezy w odniesieniu do konwekcyjnego suszenia ziarniaków pszenicy.

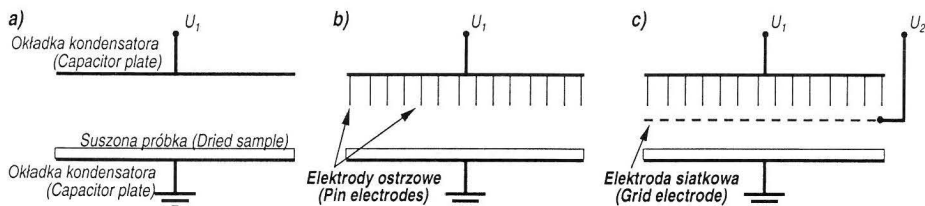


Rys. 5. Widok ogólny stanowiska badawczego

Fig. 5. General view on the test stand

Stanowisko badawcze i kondensatory pomiarowe przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Do badań wpływu pola na przebieg procesu suszenia stosowano specjalny kondensator z elektrodą siatkową. Jego dolna okładka była płaską powierzchnią

pokrytą warstwą miedzi. Górna okładka uzbrojona była w zestaw elektrod ostrzowych. Pomiędzy nimi została zainstalowana siatka, dzięki której możliwa była zmiana natężenia pola niezależnie od wielkości prądu ulotu (rys. 6) [17].



Rys. 6. Przekroje kondensatorów pomiarowych: a) do generowania sił elektrostrykcyjnych, b) do generowania wiatru jonowego, c) do generowania wiatru jonowego przy stałej wartości natężenia pola elektrycznego i prądu ulotu

Fig. 6. Measurement capacitors: a) to generate ponderomotive forces, b) to generate ionic wind, c) to generate ionic wind at constant value of electric field intensity and corona current

Badania przeprowadzono w trzech konfiguracjach układu pomiarowego, pozwalających na różnicowanie oddziaływania pola elektrycznego (tab. 1):

- 1) suszenie konwekcyjne w jednorodnym polu elektrycznym (bez wiatru jonowego),
- 2) suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym z wiatrem jonowym o natężeniu naturalnie zmiennym,
- 3) suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym przy stałej wartości prądu ulotu.

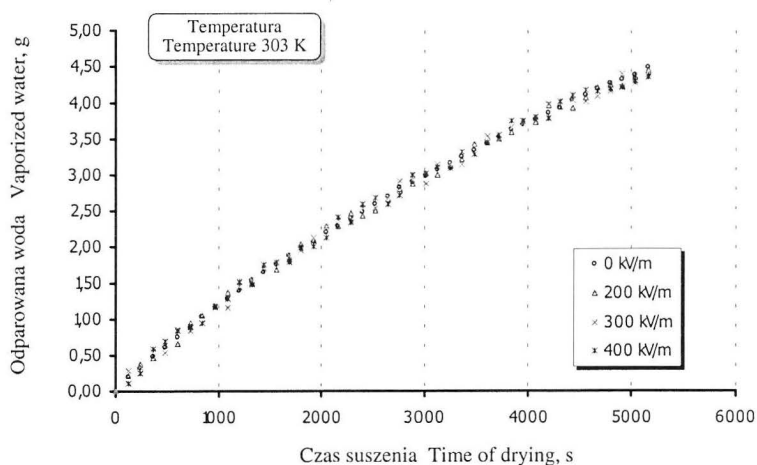
Pomiary przebiegu suszenia **w jednorodnym polu elektrycznym** prowadzone były w kondensatorze płaskim (rys. 6a). W takim układzie pomiarowym próbka ziarna pszenicy znajdowała się w jednorodnym polu elektrycznym.

O identycznym przebiegu procesów w badanym zakresie (z jednorodnym polem elektrycznym i bez) można wnioskować chociażby na podstawie końcowej masy odparowanej wody. W przypadku przebiegów z rysunku 7 rozrzut pomiędzy wartością maksymalną i minimalną był rzędu 0,13 g. Statystyczna różnica pomiędzy przebiegami wykazuje, że nie można ich uznać za różne na poziomie ufności $\alpha = 0,05$, co jest równoznaczne z brakiem mierzalnego wpływu pola.

Bez względu na stosowaną prędkość suszącego powietrza, natężenie pola elektrycznego oraz temperaturę suszącego powietrza stwierdzono, że jednorodne pole elektryczne nie wywiera wpływu na przebieg suszenia (brak potwierdzenia tezy Taruszkina [21] o możliwości wykorzystania sił strykcyjnych w procesach suszenia nasion).

Tabela 1. Parametry strumienia zapyłonego powietrza stosowanego w pomiarach**Table 1.** Dusted air stream parameters applied tests

a) Suszenie konwekcyjne w jednorodnym polu elektrycznym (bez wiatru jonowego)	
Convective drying in the electrostatic field without presence of ionic wind	
Prędkość liniowa suszącego powietrza ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$):	0,3; 1,4
Drying air velocity	
Temperatura powietrza Air temperature (K):	293, 303, 308, 313, 323
Średnia wartość natężenia pola ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$):	0, 200, 300, 400
Mean electric field intensity	
b) Suszenie w polu elektrycznym przy zmiennej w czasie wartości prądu ulotu	
Convective drying in the electrostatic field at the constant value of the corona current	
Prędkość liniowa suszącego powietrza ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$):	0,3
Drying air velocity	
Temperatura powietrza Air temperature (K):	303, 313, 323
Średnia wartość natężenia pola ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$):	0, 200, 300, 400
Mean electric field intensity	
c) Suszenie w polu elektrycznym przy stałej wartości prądu ulotu	
Convective drying in the electrostatic field at the variable value of the corona current	
Prędkość liniowa suszącego powietrza ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$):	0,3
Drying air velocity	
Temperatura powietrza Air temperature (K):	303, 308, 313
Średnia wartość natężenia pola ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$):	0, 200, 300, 400
Mean electric field intensity	

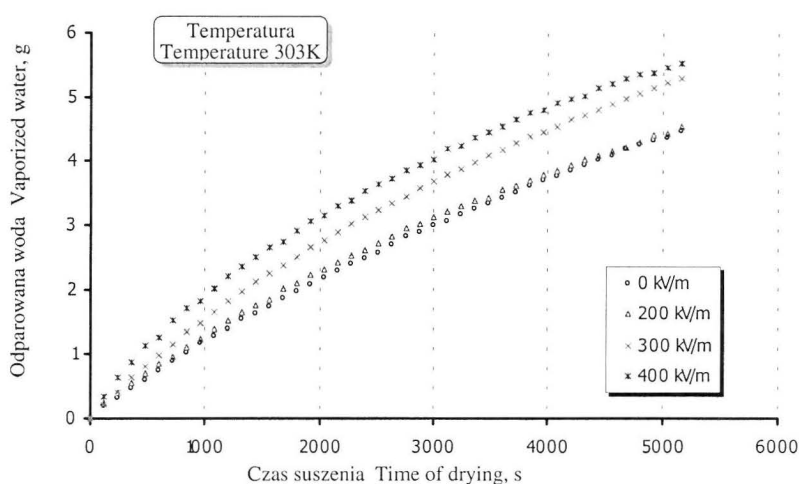
**Rys. 7.** Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 303 K w obecności jednorodnego pola elektrycznego**Fig. 7.** Removed water mass versus drying time at temperature 303 K in homogeneous electric field

W przypadku procesu suszenia konwekcyjnego w polu elektrycznym w obecności wiatru jonowego występowały dwie konfiguracje układu pomiarowego:

- kondensator z górną elektrodą wyposażoną matrycę elektrod ostrzowych (rys. 6b – w miarę odparowywania wody z próbki poprawiają się własności izolacyjne i zmniejsza się prąd ulotu),

- kondensator z dodatkową elektrodą siatkową (rys. 6c – utrzymanie stałej wartości prądu ulotu przy niezmiennym napięciu pomiędzy elektrodami).

Na rysunku 8 pokazano przebieg usuwania wody przy suszeniu w temperaturze 303 K, reprezentatywny dla pomiarów przy zmiennej wartości prądu ulotu. Widać na nim, że nawet przy temperaturze 303 K, zastosowanie pola elektrycznego z wiatrem jonowym powoduje szybsze usuwanie masy wody niż w przypadku braku pola. W przedstawionej grupie pomiarów można wnioskować, że: pole elektryczne z wiatrem jonowym intensyfikuje wymianę masy w procesie suszenia. Wzrost temperatury potęguje intensyfikację wpływu pola elektrycznego.



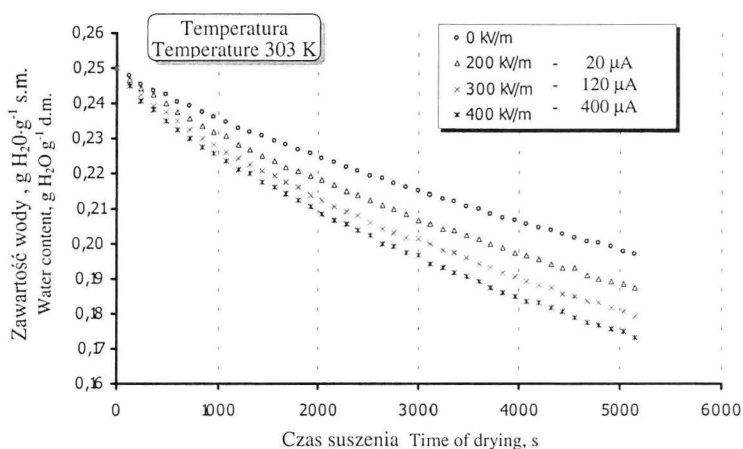
Rys. 8. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 303 K

Fig. 8. Removed water mass versus drying time at temperature 303 K

Do wykonania pomiarów przebiegu procesu suszenia przy stałej wartości prądu ulotu korzystano z kondensatora pomiarowego z dodatkową elektrodą siatkową (rys. 6c). Funkcją elektrody ostrzowej było wygenerowanie wiatru jonowego o pożądanej wartości prądu ulotu. Elektroda siatkowa pozwalała utrzymać stałą wartość natężenia pola elektrycznego. Na rysunku 9 zaprezentowano przebieg procesu, w którym wartość prądu ulotu utrzymywana była na stałym poziomie.

W porównaniu z krzywymi suszenia w takiej samej temperaturze przy niestabilizowanym prądzie ulotu można stwierdzić, że utrzymanie stałej wartości prądu ulotu pozwoliło zwiększyć względną (w porównaniu z przebiegiem procesu przy braku pola) wartość masy odparowanej wody z 1% na 18% przy $200 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, z 18% na 34% przy $300 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ i z 24% na 45% przy $400 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$.

Porównanie wykresów prędkości usuwania wody przy zmiennej i stałej wartości prądu ulotu wskazuje na podobny sposób oddziaływania wiatru jonowego. Początkowe działanie jest najsilniejsze i zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem wilgotności suszonego materiału. Utrzymanie stałej wartości prądu ulotu pozwala na przyspieszenie odparowywania wody prawie przez cały okres suszenia. Pole elektryczne przy „naturalnej” zmianie natężenia prądu ulotu intensyfikuje wymianę masy jedynie w początkowej fazie suszenia materiału.

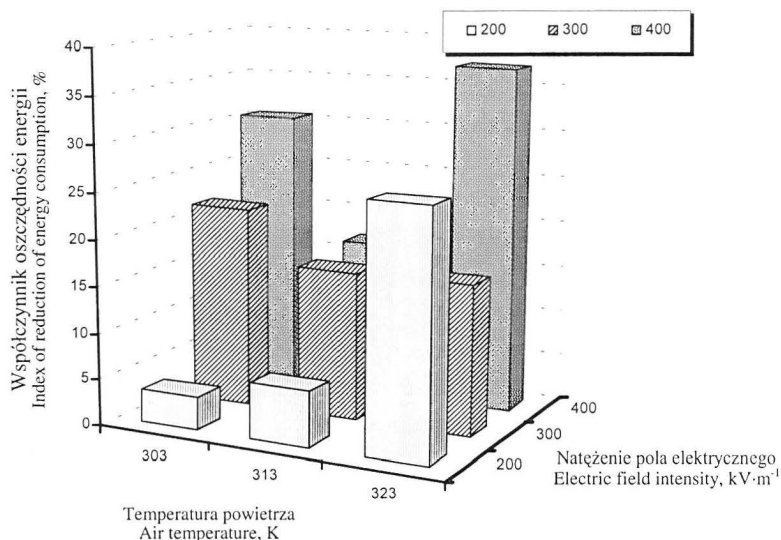


Rys. 9. Krzywe suszenia w temperaturze 303 K przy utrzymaniu stałych wartości prądu ulotu

Fig. 9. Drying curve at temperature 303 K at constant (natural) values of corona current

Powodem wprowadzenia wspomaganie suszenia konwekcyjnego polem elektrycznym jest obniżenie energochłonności suszenia konwekcyjnego w porównaniu z metodą konwencjonalną. Porównanie jest możliwe przy pomocy współczynnika oszczędności energii $q_{\%}$ [10,16].

Maksymalne oszczędności energii liczone na podstawie zawartości wilgoci po 90 minutach (5400 s) suszenia, otrzymano w przypadku maksymalnej wartości natężenia pola elektrostatycznego. Wynosiły one odpowiednio 3,6% przy $200 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ przy temperaturze 30°C , do 37,3% przy natężeniu pola $400 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ (50°C). W przypadku wyższych temperatur, wraz ze wzrostem natężenia pola wzrasta energooszczędność.



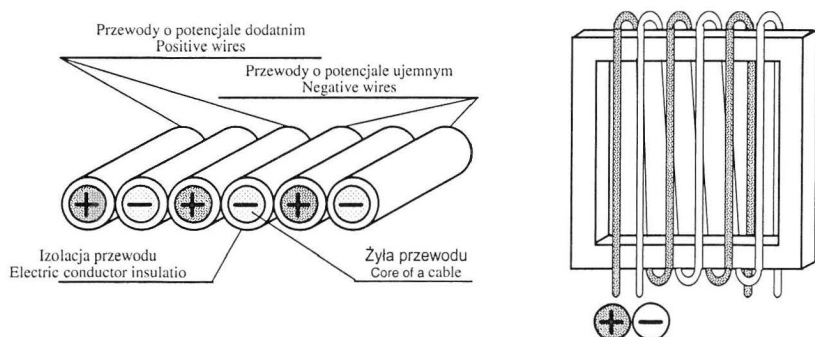
Rys. 10. Współczynnik oszczędności energii w funkcji natężenia pola
Fig. 10. Energy saving coefficient versus electric field intensity

NOWA TECHNOLOGIA ODPYLANIA ZA POMOCĄ FILTRÓW BIFILARNYCH

Mechaniczne filtry tkaninowe stanowią jedną z najprostszych metod usuwania pyłów z powietrza. Charakteryzują się wysoką sprawnością i łatwością obsługi. Są powszechnie stosowane do usuwania zanieczyszczeń powietrza. Niestety zalety równoważą wady (w postaci oporów hydraulicznych oraz konieczności okresowego oczyszczania).

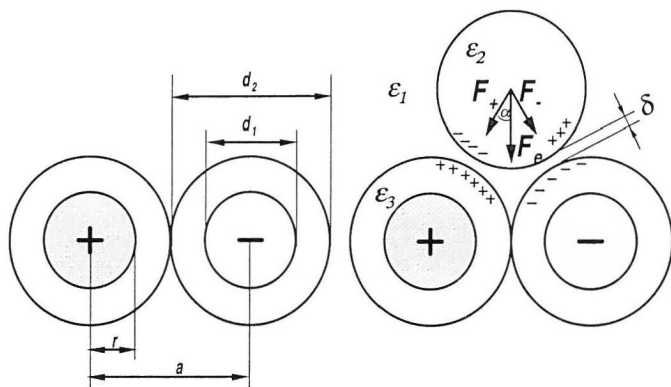
Znane filtry elektrostatyczne pozwalają na ciągłe działanie z wysoką sprawnością. Oznacza to eliminację wad filtrów mechanicznych - wprowadzanie oporów hydraulicznych i przerw w działaniu. Wadą filtrów elektrostatycznych jest sposób pracy elektrody ulotowej. Napięcie zasilania elektrofiltru utrzymywane jest na poziomie wyładowania niezupełnego. Nie istnieje więc możliwość zastosowania typowego elektrofiltru w przypadku pyłu o właściwościach wybuchowych [4,13].

Filtr z uzwojeniem bifilarnym wytwarza pole elektryczne bez wyładowań. Dla uzwojenia bifilarnego charakterystyczny jest sposób nawinięcia uzwojeń (naprzemienny układ przewodów - rys. 11). Skutkiem tego „z zewnątrz” urządzenie nie wykazuje indukcyjności. Jeżeli uzwojenie będzie zasilane napięciem, które nie powoduje wyładowania ulotowego, możliwe będzie wprowadzenie filtru do przemysłu rolno-spożywczego.



Rys. 11. Układ przewodów uzwojenia bifilarnego i sposób nawinięcia ramki filtra
Fig. 11. Configuration of bifilar winding wires and filter frame arrangement

Pyły pochodzenia roślinnego są zazwyczaj dielektrykami o molekułach składających się z symetrycznie rozłożonych ładunków i w polu elektrycznym wykazują elektryczny moment dipolowy [12]. Oddziaływanie niejednorodnego pola elektrostatycznego uzwojenia z ładunkami indukowanymi w cząstkach pyłów wywołuje siły przyciągające pył do powierzchni uzwojenia. Siła oddziaływania pola elektrycznego na cząsteczki pyłów zależy od natężenia pola elektrycznego i od wartości ładunków swobodnych, które zależą od właściwości elektrycznych pyłów [12].



Rys. 12. Stosowane oznaczenia wymiarów elektrod i rozkład sił działających na dielektryczną cząstkę w uzwojeniu bifilarnym

Fig. 12. Electrodes dimensions and distribution of forces acting on a particle in a bifilar winding

Z zależności (4) wynika, że na siłę oddziaływania pola elektrycznego na cząstkę pyłu, a tym samym na skuteczność działania odpylacza bifilarnego w układzie elektrod z rysunku 12, wpływa konstrukcja układu elektrod (średnica, odległość

między elektrodami, przenikalność dielektryczna i przewodność izolacji) i parametry cząstek pyłu (wymiary, przenikalność dielektryczna i przewodność).

W analizowanym przypadku przewodności γ_1 , γ_2 , γ_3 są pomijalnie małe (dielektryki) i posiadają podobne wartości. Szczelina powietrzna δ jest znikoma w porównaniu z gabarytami uzwojenia. Otaczającym ośrodkiem jest powietrze ($\epsilon_1 = 1$). Wzrost przewodności izolacji i zmniejszenie jej grubości prowadziłyby tylko do obniżenia wytrzymałości elektrycznej układu. Krytyczne znaczenie dla przebicia izolacji uzwojenia ma wartość napięcia zasilającego układ U .

$$F_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 U^2 S_{ef} \cos \frac{\alpha}{2}}{\left(2\delta + 2l_3 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_1^2}{\gamma_3^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_3^2}} + l_2 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_1^2}{\gamma_2^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_2^2}} \right)^2}, \quad (4)$$

gdzie: F_e – siła przyciągania cząstki dielektryka, N,

ϵ_0 – stała dielektryczna ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$),

ϵ_1 – względna przenikalność dielektryczna środowiska zewnętrznego,

ϵ_2 – przyciąganej cząstki pyłu, ϵ_3 – izolacji uzwojenia bifilarnego,

γ_1 – przewodność dielektryczna środowiska zewnętrznego,

γ_2 – przyciąganej cząstki pyłu, γ_3 – izolacji uzwojenia bifilarnego, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$,

δ – wielkość szczeliny powietrznej pomiędzy cząstką a uzwojeniem, m,

l_2 – odległość pomiędzy punktami kontaktu cząstki z przeciwnymi przewodami uzwojenia, m,

l_3 – grubość izolacji uzwojenia bifilarnego, m,

S_{ef} – średni przekrój efektywny przenikania strumienia indukcji elektrycznej przez cząstkę dielektryka, m^2 ,

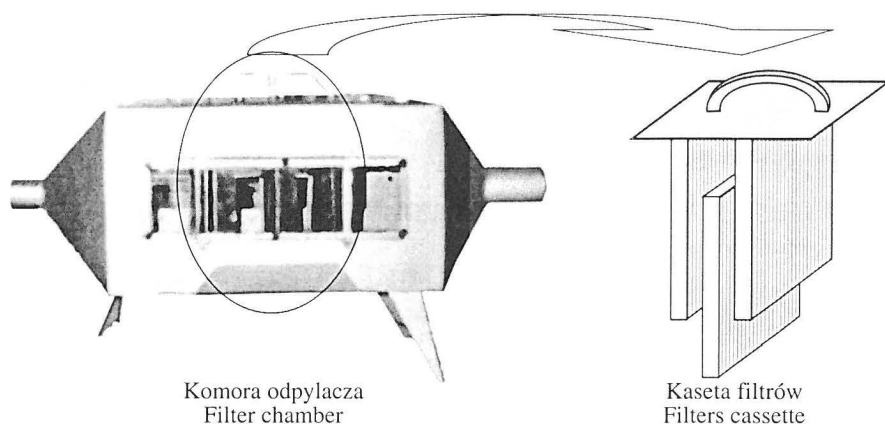
ω – pulsacja napięcia zasilającego uzwojenie, s^{-1} ,

α – połowa kąta wyznaczonego przez proste przechodzące przez środek cząstki pyłu i środki przewodów elektrod,

U – wartość napięcia zasilającego, V.

Ostateczna półtechniczna wersja komory odpylającej [20] wykonana została z blachy stalowej (eliminacja osadzania pyłu na ścianach komory – uziemienie, wytrzymałość wymagana do udarowego oczyszczania elektrod), z zestawem ramek filtrów w postaci jednej zwartej kasety (rys. 13). Kompletnie zestawienie danych dotyczących materiału badawczego wraz z zakresami pomiarowymi stosowanymi przy pomiarach skuteczności odpylania zamieszczono w tabeli 2.

Sprawność odpylania określano metodą standardową, w której podstawą jest masa pyłu wprowadzonego i zatrzymanego w komorze [13].



Rys. 13. Komora filtrująca i kaseta filtrów
Fig. 13. Filter chamber and filters cassette

Maksymalna wartość napięcia stosowanego przy badaniu pracy odpylacza (tab. 2) podyktowana została wytrzymałością elektryczną uzwojeń filtru. Próby wytrzymałościowe pokazały, że izolacja przewodów charakteryzuje się napięciem przebicia o zakresie $38 \div 68$ kV. Zaobserwowano także, że mimo braku skrośnego przebicia izolacji, już przy 15 kV „często dochodziło do wyładowań między żyłami wolnych końców przewodów uzwojenia” [2]. Stosowane w badaniach napięcie 12 kV gwarantowało maksimum skuteczności, przy równoczesnym 3 kV marginesie bezpieczeństwa.

Filtr bifilarny powinien łączyć cechy istniejących filtrów stosowanych w przemyśle spożywczym i elektrofiltrów. Dlatego zakres badanych prędkości strumienia został dobrany tak, aby odpowiadał prędkościom strumienia występującym w filtrach tkaninowych ($0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) i suchych elektrofiltrach energetycznych ($1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) tj. $0,3 \div 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Szczegółowe zestawienie wyników pomiarów sprawności odpylania dla obu stosowanych typów pyłów i stosowanych napięć zasilających uzwojenie filtru zamieszczono w tabeli 3 oraz na rysunku 14.

Komora filtrująca w stanie beznapięciowym zatrzymuje $86,3 \div 88,0\%$ zanieczyszczeń. Pył wydziela się opadając na dno komory pod wpływem sił grawitacji i zawirowań. Przyłożenie napięcia $8 \div 12$ kV podnosi sprawność odpylania do $90,9 \div 97,6\%$. Sprawność odpylania wzrasta wraz ze wzrostem napięcia zasilającego.

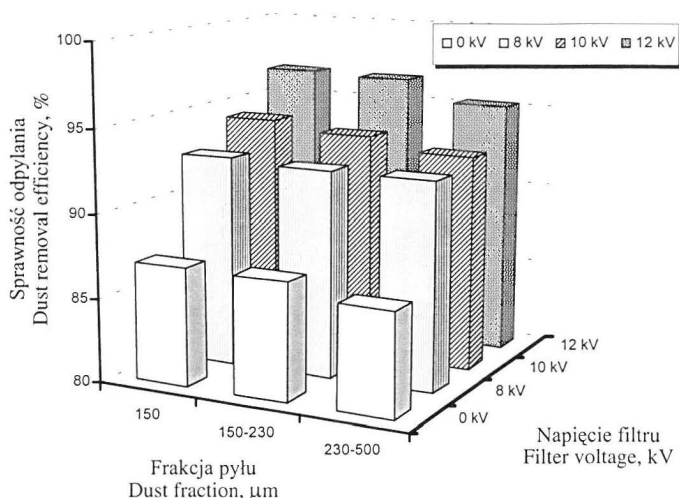
Tabela 2. Badany materiał i zakresy pomiarowe**Table 2.** Tested dust material and the range of measurements

Pył Dust material					
Pszenica odmiany Torka (wilgotność 12%, zawartość białka 14,6%, zawartość glutenu 28,0%) Torka wheat (water content 12%, protein content 14.6%, gluten content 28.0%)					
Frakcje pyłu mąki pszennej	Wheat flour dust fraction (μm):	<150	150÷230	230÷500	
Frakcje otrębów pszennych	Wheat bran dust fraction (μm):	<150	150÷230	230÷500 >500	
Parametry strumienia zapyłonego gazu Dusted flow parameters					
Prędkość liniowa	Air velocity (m·s ⁻¹)	0,30	0,50	0,70	
Strumień zapyłonego powietrza	Air flow (m ³ ·s ⁻¹)	0,015	0,024	0,034	
Stężenie pyłu	Dust concetration (g·m ⁻³)	9,18	5,51	3,94	
Stosowane napięcia zasilania uzwojeń filtru Voltage of filter winding					
Napięcie	Voltage (kV)	0,	8,	10,	12
Średnice przewodów uzwojenia filtru Winding diameters					
Średnica żyły	Cable core diameter (mm)	0,38	1,38	1,72	2,76
Średnica razem z izolacją	Insulated cable diameter (mm)	1,08	2,48	3,34	4,50

W badanej grupie najefektywniej wychwytywane były cząstki o najmniejszych gabarytach (<150 μm) (tab. 3, rys. 14). Identyczny efekt występuje w pozostałej części zakresu pomiarowego.

Tabela 3. Wyniki pomiaru sprawności odpylania (%) dla pyłu mąki pszennej i otrębów o stężeniu 5,51 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ i prędkości liniowej strumienia powietrza równej 0,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ **Table 3.** The wheat flour and bran dust removal results for concentration 5.51 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and air velocity equal to 0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Frakcja pyłu (μm) Dust fraction	0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
Mąka pszenna Wheat flour				
< 150	87,08	92,67	94,25	96,75
150-230	87,00	92,42	93,67	96,58
230-500	86,17	92,42	92,92	95,25
Otręby pszenne Wheat bran				
< 150	88,00	93,08	94,67	96,33
150-230	87,58	92,42	92,83	96,33
230-500	87,25	92,08	93,92	95,67
>500	86,25	92,00	93,58	94,42



Rys. 14. Sprawność odpylania dla pyłu z mąki pszennej dla badanych kombinacji frakcji i napięć zasilających filtr przy prędkości strugi $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (stężeniu pyłu $5,51 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig. 14. The wheat flour dust removal efficiency for tested combination of fractions and supply voltage at velocity of $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (dust concentration $5.51 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Wyniki pomiarów oporu hydraulicznego, wprowadzanego przez komorę odpylacza wyposażoną w kasetę złożoną z 3 ramek filtrów zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Opór hydrauliczny badanego filtra bifilarnego i wybranych filtrów tkaninowych

Table 4. The hydraulic resistance of tested bifilar filter and some selected fabric filters

Prędkość linio- wa strumienia Flow velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Odpylacz bifilarny Bifilar filter			Filtr tkaninowy przy $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Fabric filter at $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	
	Komora bez kasety Chamber without cassette (Pa)	Kaseta „czysta” Chamber with „clean” cassette (Pa)	„Pełne obło- żenie” Chamber with „dirty” cassette (Pa)	Typ Type	Opór przepływu Hydraulic resistance
0,3	284,0	303,8	295,8	ET-2	348,1
0,5	482,5	536,2	516,3	ET-10	220,2
0,8	996,6	1016,1	1008,4	ET-5	378,1

Największy wpływ na opór hydrauliczny ma konstrukcja komory odpylacza (podstawowy czynnik zaburzający strumień). Obłożenie filtra pyłem zmniejsza opór wprowadzany przez cały układ poprzez zmniejszenie wpływu lokalnych

zawiorań strumienia powietrza. Wprowadzenie do komory odpylacza kasety filtru zmienia opór jedynie w kilku procentach, zaś zmiana oporu wywoływana zanieczyszczeniami jest jeszcze mniejsza. Filtry tkaninowe wprowadzają opory hydrauliczne o wartościach zbliżonych do oporów wprowadzanych przez filtry bifilarne, przy liniowej prędkości strumienia powietrza mniejszej o rząd wielkości ($0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ – bifilarny, $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ – tkaninowy).

WNIOSKI

1. Znajomość właściwości elektrycznych ziarniaków zbóż może być wykorzystywana przy konstruowaniu suszarek konwekcyjnych wspomaganych polem elektrycznym z wiatrem jonowym. Wartości współczynnika oszczędności energii (od kilku do kilkudziesięciu procent) uzyskane w laboratoryjnej fazie badań przybliżają perspektywiczną możliwość wykorzystania takich rozwiązań w przemyśle.

2. Występowanie różnych maksymalnych wartości składowej rzeczywistej przenikalności elektrycznej pyłu (uzależnionej od napięć, frakcji pyłu) sugeruje możliwość wykorzystania filtru do selektywnego wychwytywania cząstek pyłu.

3. Cechą charakterystyczną skonstruowanych filtrów bifilarnych jest skuteczne usuwanie cząstek pyłów roślinnych o małych gabarytach. Przy tym opory hydrauliczne wprowadzane przez filtr bifilarny, w zakresie prędkości gazów typowych dla filtrów tkaninowych, są znacząco mniejsze. Podsuwa to rozwiązanie skojarzenia dwóch typów filtrów (bifilarnego z tkaninowym lub filtrem mechanicznym), który wykazuje lepsze parametry przy filtrowaniu „dużych” zanieczyszczeń (o średnicach $> 500 \mu\text{m}$).

PODSUMOWANIE

Filtr z uzwojeniem bifilarnym może być częścią inteligentnego systemu odpylania, w którym można połączyć monitoring rozmiarów cząstek ze sterowaniem zasilania filtru (dodatkowo kształtowanie wartości i kształtu napięcia zasilającego, kontrola stanu zabezpieczeń zespołu zasilającego, wykrywanie wyładowań w komorze elektrofiltru, modyfikowanie parametrów zasilania, prezentacja zadeklarowanych wartości nastaw filtru oraz bieżących parametrów pracy).

PIŚMIENNICTWO

1. **Adamkiewicz J., Pietrzyk W., Zlonkiewicz Z., Ścibisz M.:** Pomiar rezystancji ziarniaków zbóż poddanych działaniu naprężeń mechanicznych. Materiały konferencyjne V Sympozjum Naukowe AR, 255-256, Szczecin, 1993.

2. **Adamkiewicz J., Wawszczak J., Ścibisz M.:** Parametry uzwojeń bifilarnych stosowanych w urządzeniach odpylających przemysłu rolno-spożywczego. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 9-15, 2001.
3. **Ashmann G., Kronig R.:** The influence of electric fields on the convective heat transfer in liquids. *Appl. Sci. Res.*, A2, 235-244, 1950.
4. **Bach S.:** Problemy diagnozowania stanu technicznego suchych elektrofiltrów płytowych. *Ochrona Powietrza*, 6, 1990.
5. **Baran J.:** Influence of some material properties on electrostrictive effects within a dielectric model of grain. *Proc. of the 11th Congress on Agr. Eng.*, Dublin, vol. 4, 2205-2210, 1989.
6. **Baran J.:** Elektrostatyczne efekty strykcyjne w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, 1990.
7. **DeHann H.J.:** The influence of electric fields on the convective heat transfer in liquids. *Appl. Sci. Res.*, A3, 85-88, 1951.
8. **Hanzelik F., Hlaváčová Z.:** Príspevok k štúdiu dielektrických vlasností zŕn jačmeňa. *Acta Technologica Agriculturae*, 30, 79-86, 1990.
9. **Klauznicer J., Pluta Z., Staniszewski S.:** Wpływ pola elektrycznego na rozwiniętą laminarną konwekcję swobodną w przestrzeni zamkniętej. *Archiwum termodynamiki i spalania*, 9, 3, 453, 1978.
10. **Krakowiak J., Pietrzyk, W.:** Utilization of strong electrostatic field in drying process. 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 37-38, 1991.
11. **Lawrence K. C., Nelson S. O., Kraszewski A. W.:** Temperature-dependence of the dielectric properties of wheat. *Transactions of the ASAE*, 33, 5, 535-540, 1990.
12. **Leonov V.S.:** Elektriceskije sily diejstvujuscije na siemena pri dielektriceskoj separaci. *Mechanizacija i elektrifikacija siel'skogo chozjajstva*, 5, 32-34, 1980.
13. **Lutyński J.:** Elektrostatyczne odpylanie gazów. WNT, Warszawa, 1965.
14. **Lykoudis P.S., Yu C.P.:** The Influence of electric forces on natural thermal convection. *J. Heat and Mass Transfer*, 6, 853-862, 1963.
15. **O'Brien R.J., Shine A.J.:** Some effects of an electrical field on heat transfer from a vertical plate in free convection. *J. Heat Transfer*, 2, 114-116, 1967.
16. **Pietrzyk W.:** Electric field influence on grain. *Acta Agrophysica*, 5, 1996.
17. **Pietrzyk W., Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Walusiak S., Grundas S.:** Uzwojenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym. *Acta Agrophysica*, 43, 70-88, 2000.
18. **Sadek S.E., Fax R. G., Hurwitz M.:** The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection. *Trans. ASAE*, 94, Series C, (2), 144-148, 1972.
19. **Senftleben H.:** Die Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Wärmeleitvermögen von Gasen. *Phys. Zeitschr.*, 32, 550, 1931.
20. **Sumorek A., Pietrzyk W.:** Model filtru bifilarnego dla pyłów organicznych. VI Konferencja Naukowo-Techniczna pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN "Zastosowania komputerów w elektrotechnice", I, 187-190, 2001.
21. **Taruszkin W.I.:** Distribution of ponderomotive forces on grains during separation (in Russian). *M.i.E.S.Ch.*, 12, 35-39, 1983.
22. **Wolny A.:** Wpływ pola elektrycznego na suszenie powierzchni cylindrycznej. Materiały VII Sympozjum Suszarnictwa, Politechnika Łódzka, II, 241-245, 1991.

ELECTRIC PROPERTIES OF GRAIN AND MILLING FRACTIONS IN ELECTROTECHNOLOGIES

Andrzej Sumorek, Marek Horyński, Wiktor Pietrzyk

Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Lublin
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
e-mail: sumek@elektron.pol.lublin.pl

Abstract. Paper presents research results of some selected electrical properties of grain and grain dust. The measurements concern resistivity, real and imaginary parts of dielectric permittivity. There are results of new electrotechnology tests i.e.: convective wheat grain drying in presence of electric field and corona wind, dust removal using bifilar filters. The investigations were carried out in the Department of General Electrotechnology. The energy saving ratio factor achieved value of 37% at tested range, at minimal used air velocity and maximal used electric field intensity value. Results of research on the bifilar filters point out the possible increase of dust removal efficiency between 5 and 11% in comparison to fabric filters.

Key words: electric properties of grain, corona wind, bifilar filter