

PODNOSZENIE WSPÓŁCZYNNIKA WYMIANY MASY PROCESU SUSZENIA KONWEKCYJNEGO ZA POMOCĄ POLA ELEKTRYCZNEGO

Andrzej Sumorek, Wiktor Pietrzyk

Katedra Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej, Politechnika Lubelska

Streszczenie. Jednym z powszechnie stosowanych i bardziej energochłonnych procesów technologicznych jest proces suszenia konwekcyjnego, dlatego obniżenie zapotrzebowania na energię jest w tym przypadku ważnym zagadnieniem. Można to osiągnąć przez dobór odpowiedniej technologii suszenia i/lub przez zastosowanie dodatkowych czynników intensyfikujących proces. Przy poszukiwaniu takich czynników konieczne wydaje się poznanie przebiegu suszenia konwekcyjnego w przypadku umieszczenia suszonego materiału w polu elektrycznym lub wprowadzenia pola do otoczenia suszonego materiału. Jak wykazały badania wiatr jonowy może być czynnikiem, który intensyfikuje proces wymiany masy.

W niniejszym artykule zostały przedstawione wyniki eksperymentów suszenia konwekcyjnego pszenicy w obecności pola elektrycznego.

Słowa kluczowe: suszenie konwekcyjne, pole elektryczne, siła elektrostrykcyjna, wiatr jonowy

WSTĘP

Ograniczenie zapotrzebowania na energię przy suszeniu konwekcyjnym można osiągnąć przez oddziaływanie na proces transportu ciepła i masy w gazie lub suchym materiale.

Często spotykanym w literaturze przypadkiem analizy wymiany ciepła jest układ cylindryczny, w którym proces ten zachodzi pomiędzy ułożonym poziomo, nagrzanym, cienkim przewodem a otaczającym go cylindrem o innej temperaturze i innym potencjale elektrycznym [Lykoudis i Yu 1963, Wolny 1991]. W analizowanym przypadku założono, że w obecności pola elektrycznego w molekułach gazu wypełniającego przestrzeń pomiędzy przewodem a cylindrem zaindukuje się moment dipolowy. Dipole, mając stały moment dipolowy, dążą do ustawienia się zgodnie z liniami sił pola elektrycznego. W rezultacie cząsteczki, które znajdują się pod działaniem sił pola elektrycznego będą przesuwane. Wzmocni to dodatkowo przepływ termiczny. Przepływ ten w przypadku konwekcji naturalnej może spowodować wzrost szybkości wymiany ciepła i masy.

Opisany przypadek dotyczy eksperymentalnych i analitycznych układów, w których źródłem ciepła i pola elektrycznego jest ten sam element (pręt, cienki drut). Wyniki

analizy innego typu układu zaprezentowano w pracy Klauznicera *i in.* [1978], gdzie źródło ciepła nie jest bezpośrednio źródłem pola elektrycznego. W tym układzie przewodnik o niezerowym potencjale umieszczono pośrodku uziemionej komory. Był on źródłem niejednorodnego pola elektrycznego. Energia cieplna przekazywana była pomiędzy pionowymi powierzchniami o różnych temperaturach. W wyniku numerycznego rozwiązania równania opisującego siły działające na ciało umieszczone w polu elektromagnetycznym stwierdzono, że pole elektryczne może zwiększać wymianę ciepła. Powodem tego wzrostu są siły elektrostrykcyjne pojawiające się w gazie.

Dwa opisane przykłady odnoszą się do oddziaływania pola elektrycznego na nośnik ciepła, który w przypadku procesu suszenia konwekcyjnego jest zarazem czynnikiem suszącym (powietrze). Równie ważne jest oddziaływanie pola na suszony materiał. W dielektryku o strukturze niejednorodnej (warstwowej) poddanym działaniu pola elektrostatycznego mogą powstawać naprężenia (siły elektrostrykcyjne). Przykładowo, na ziarniaki zbóż naelektryzowane w zjonizowanym polu elektrycznym i umieszczone w polu elektrycznym mogą działać trzy siły [Pietrzyk 1996]:

1. Siły ponderomotoryczne F_e wywołane ładunkami swobodnymi, określone zależnością:

$$F_e = \int_V \rho E dV, \quad (1)$$

gdzie:

E – natężenie pola elektrycznego, $V m^{-1}$;

ρ – gęstość objętościowa ładunku elektrycznego, $C m^{-3}$;

V – objętość, m^3 .

2. Siły ponderomotoryczne F_p wywołane oddziaływaniem ładunków przesunięcia z zewnętrznym polem:

$$F_p = -\frac{1}{2} \int_0^V E^2 \text{grad } \varepsilon dV, \quad (2)$$

gdzie:

$\text{grad } \varepsilon$ – gradient uwzględniający zmienność przenikalności elektrycznej materiału,

ε – przenikalność bezwzględna materiału, $F m^{-1}$;

3. Siły elektrostrykcyjne F_s , które są wynikiem wzajemnego oddziaływania pola elektrycznego i ładunków indukowanych na granicach warstw:

$$F_s = \frac{1}{2} \int_V \text{grad} \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right) dV, \quad (3)$$

gdzie:

τ – gęstość materiału, $kg m^{-3}$;

$\partial \varepsilon / \partial \tau$ – zmiana przenikalności materiału spowodowana zmianą gęstości podczas jego deformacji w polu elektrycznym.

Wysunięto hipotezę [Taruskin 1983], że ściskanie i rozciąganie siłami elektrostrykcyjnymi poszczególnych warstw dielektryka (np. ziarniaka, przy założeniu, że ziarni-

niak w rozważaniach modelowych odpowiada sferoidzie o strukturze warstwowej), może prowadzić do zmiany jego zdolności do zatrzymywania wilgoci. Hipotezę tę zdają się potwierdzać wyniki obliczeń rozkładu sił w dielektryku sferoidalnym o strukturze warstwowej [Pietrzyk 1996].

PRZEBIEG EKSPERYMENTU

W celu weryfikacji hipotezy o możliwości wpływania pola elektrycznego na przebieg suszenia konwekcyjnego konieczne było skonstruowanie stanowiska badawczego, w którym możliwe byłoby niezależne badanie wpływu pola elektrostatycznego i wiatru jonowego na przebieg suszenia jednowarstwowej próbki ziarniaków pszenicy.

Pierwszym krokiem było wstępne określenie stopnia wilgotności materiału. Wilgotność wstępną oraz wilgotność próbki po nawilżeniu mierzono miernikiem wilgotności ziarna Grainer II PM-300. Na około 72 godziny przed przeprowadzeniem próby suszenia próbki były nawilżane w komorze klimatyzacyjnej KPW-1. Głównym elementem stanowiska badawczego była komora suszarnicza. W niej umieszczany był kondensator pomiarowy z badaną próbką, która omywana była przez strumień powietrza o zadanej temperaturze, wytwarzany przez termowentylator umieszczony na wlocie komory. Grzałka termowentylatora zasilana była przez układ stabilizacji temperatury, bazujący na przetwornikach temperatura-prąd (B111). Możliwe było utrzymywanie temperatury czynnika suszącego niezależnie od temperatury zewnętrznej z dokładnością ± 1 K. Pomiar temperatury na wlocie i wylocie z komory realizowano za pomocą przetworników temperatura-prąd, które pozwalały na pomiary z rozdzielczością do $\pm 0,1$ K. Okresowo, za pomocą anemometru N-194, sprawdzano prędkość strumienia powietrza w komorze. Przed rozpoczęciem procesu suszenia wygrzewano komorę i wykonywano pomiar wilgotności powietrza suszącego termohigrometrem P570. Pomiar masy próbki przed suszeniem oraz bieżącą kontrolę ubytku masy próbki w trakcie suszenia prowadzono cyfrową wagą laboratoryjną Precisa 5000 D -12000 G.



Rys. 1. Przekroje kondensatorów pomiarowych: a) do generowania sił elektrostrykcyjnych, b) do generowania wiatru jonowego

Fig. 1. Cross-sections of measurement capacitors: a) to generate electrostrictive forces, b) to generate corona wind

Próbki umieszczane były wewnątrz komory suszarniczej na dolnej okładce kondensatora połączonego z wagą laboratoryjną, rejestrującą bieżącą masę próbki w czasie 1,5-godzinnego procesu suszenia. W zależności od badanego zjawiska stosowano kondensator z okładkami w postaci płyt płaskich (rys. 1a) lub z górną okładką wyposażoną w matrycę elektrod ostrzowych (rys. 1b).

Czynnikiem suszącym było ciepłe powietrze. Wykonano serie pomiarów w poniższych zakresach natężenia pola i temperatury:

- zakres natężenia pola: 0, 200, 300, 400 kV m⁻¹;
- zakres temperatur powietrza 30, 40, 50 °C (303, 313, 323 K).

WYNIKI POMIARÓW

Procesy wymiany ciepła i wymiany masy traktuje się zwykle oddzielnie i niezależnie. Przy rozpatrywaniu procesu suszenia są one ze sobą nierozzerwalnie związane. Jednym ze sposobów opisu dynamiki procesu suszenia może być określenie współczynnika wymiany masy. Podanie jednej wartości współczynnika jest tu niewystarczające, ponieważ ze względu na zmianę parametrów suszonego materiału, zmieniają się warunki suszenia.

Proces wnikania masy z suszonej powierzchni do otaczającego powietrza można opisać równaniem [Hobler 1968]:

$$G_A = \beta_A F \Delta \pi_A, \quad (4)$$

gdzie:

G_A – szybkość wnikania masy, g s⁻¹;

β_A – współczynnik wymiany masy, g m⁻² s⁻¹;

F – pole powierzchni, m²;

$\Delta \pi_A$ – bezwymiarowy moduł napędowy (zależny od ciśnienia cząstkowego gazu dyfundującego i średniego gazu obojętnego).

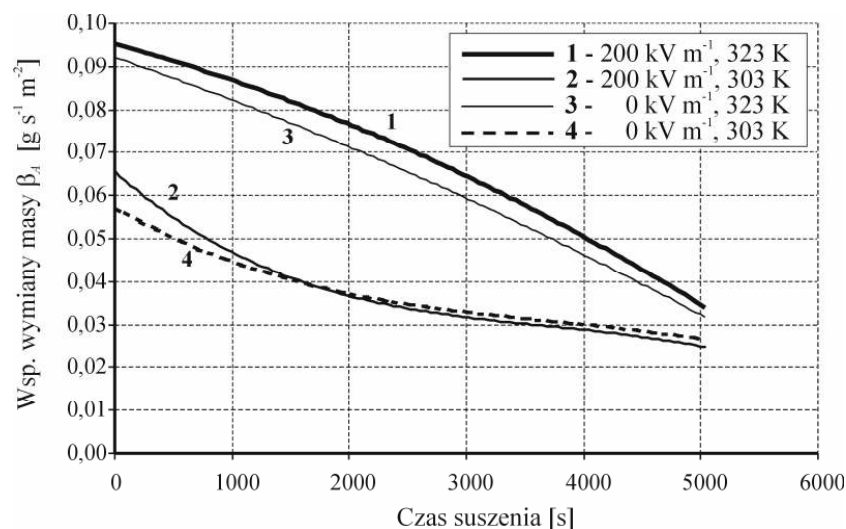
Współczynnik wymiany masy określa, jaka masa czynnika przenika w jednostce czasu pomiędzy suszoną powierzchnią a czynnikiem suszącym.

W wyniku pomiarów otrzymywano zestaw danych o masie odparowanej wody w funkcji czasu suszenia. Posiadając takie dane i zakładając, że suszoną próbkę traktuje się jako powierzchnię o wielkości równej powierzchni okładki kondensatora, można obliczyć wartość współczynnika wymiany masy β_A w każdej chwili procesu suszenia [Pietrzyk *i in.* 1998].

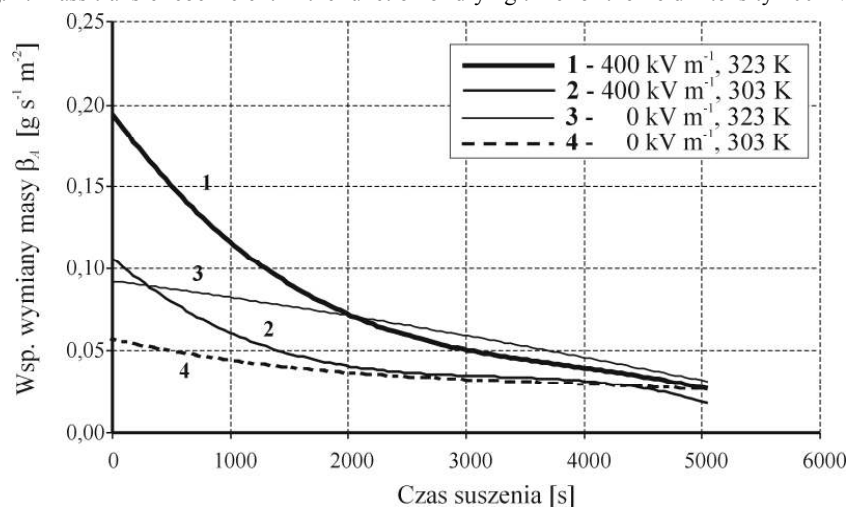
Wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej za pomocą testu Studenta. Bazując na teście różnic, określono czy w danej chwili wartość średnia masy wody usuniętej z próbek konwencjonalną metodą suszenia konwekcyjnego równa jest wartości średniej masy wody usuniętej z próbek poddanych w czasie suszenia działaniu pola elektrycznego. Została więc postawiona hipoteza o równości wartości średnich masy odparowanej wody. Hipotezą alternatywną jest twierdzenie, że masa odparowanej wody zależy od występowania pola elektrycznego. Przyjęto poziom istotności 0,05, co odpowiada prawdopodobieństwu na poziomie 95%.

Pierwszą część eksperymentu przeprowadzono z użyciem kondensatora płaskiego (rys. 1a). Na podstawie wyników pomiarów oraz testu różnic Studenta stwierdzono z prawdopodobieństwem równym i wyższym niż 95%, że w kondensatorze bez elektrod

ostrzowych brak jest mierzalnego wpływu pola na przebieg procesu suszenia [Sumorek 2001]. Dalszą część eksperymentu suszenia przeprowadzono w kondensatorze z matrycą elektrod ostrzowych.



Rys. 2. Współczynnik wymiany masy w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 200 kV m^{-1}
Fig. 2. Mass transfer coefficient in the function of drying time for the field intensity 200 kV m^{-1}



Rys. 3. Współczynnik wymiany masy w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 400 kV m^{-1}
Fig. 3. Mass transfer coefficient in the function of drying time for the field intensity 400 kV m^{-1}

Na podstawie wybranych przebiegów współczynników wymiany masy β_A , dla pola elektrycznego o natężeniu 200 i 400 kV m^{-1} , można zauważyć, że:

- Wyższej temperaturze suszącego powietrza towarzyszy większy współczynnik wymiany masy (rys. 2 i 3; krzywe 1 i 3 odpowiadają temperaturze 323 K, krzywe 2 i 4 odpowiadają temperaturze 303 K).
- Wprowadzenie pola elektrycznego wywołuje zwiększenie wartości współczynników wymiany masy (krzywe 1 i 2 z polem, krzywe 3 i 4 bez pola).
- Zwiększenie współczynnika wymiany masy, spowodowane występowaniem pola elektrycznego z wiatrem jonowym, obserwuje się zwłaszcza w początkowym okresie suszenia, przy dużej wilgotności suszonego dielektryka. Zjawisko uwidacznia się wraz ze wzrostem natężenia pola. O ile przy natężeniu 200 kV m^{-1} i temperaturze 323 K (rys. 2, krzywe 1 i 3) pole elektryczne zwiększało współczynnik wymiany masy przez cały 1,5-godzinny okres suszenia, to wpływ pola z wiatrem jonowym przy natężeniu 400 kV m^{-1} i temperaturze 323 K (rys. 3, krzywe 1 i 3) widoczny jest tylko przez około 30 minut.
- Zastosowanie wspomagania suszenia konwekcyjnego polem elektrycznym o natężeniu $E = 400 \text{ kV m}^{-1}$ może przyspieszyć wymianę masy w początkowej fazie suszenia bardziej niż podniesienie temperatury o 20 K (rys. 3, krzywe 2 i 3).

WNIOSKI

1. W przypadku poddanych suszeniu jednowarstwowych próbek ziarniaków pszenicy nie stwierdzono wpływu jednorodnego, niezjonizowanego pola elektrycznego na kinetykę procesu suszenia konwekcyjnego.
2. Pole elektryczne z wiatrem jonowym zwiększa szybkość wymiany masy w procesie suszenia w jego początkowej fazie, tj. przy dużej wilgotności próbki.

PIŚMIENNICTWO

- Hobler T. 1968: Ruch i wymienniki ciepła. WNT, Warszawa.
- Klauznicer J., Pluta Z., Staniszewski S. 1978: Wpływ pola elektrycznego na rozwiniętą laminarną konwekcję swobodną w przestrzeni zamkniętej. *Archiwum termodynamiki i spalania*, 9, 3, 453.
- Lykoudis P.S., Yu C.P. 1963: The Influence of electric forces on natural thermal convection. *J. Heat and Mass Transfer*, 6, 853–862.
- Pietrzyk W. 1996: Electric field influence on grain. *Acta Agrophysica*.
- Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A. 1998: Wykorzystanie pola elektrycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż. *Acta Agrophysica* 16.
- Sumorek A. 2001: Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenie ziarna zbóż. *Acta Agrophysica*, 41.
- Taruskin W.I. 1983: Distribution of ponderomotive forces on grains during separation (in Russian). *M.i E.S.Ch.*, 12, 35–39.
- Wolny A. 1991: Wpływ pola elektrycznego na suszenie powierzchni cylindrycznej. *Materiały VII Sympozjum Suszarnictwa*, Politechnika Łódzka, II, 241.

USE OF ELECTRIC FIELD FOR INCREASING MASS TRANSFER COEFFICIENT OF CONVECTION DRYING

Summary. Because of numerous common applications of drying processes and their energy consumption its reduction is an important task. This reduction can be achieved by the appropriate drying methods and/or the introduction of certain factors to intensify the process. Therefore it is necessary to know the drying process course in conditions when drying material is exposed to the electric field or to some factors produced by the electric field in the environment. The electrostatic field and corona wind could be the factors that enforce mass transfer.

The paper presents the measurement results of convective drying in the electric field of wheat grain.

Key words: convective drying, electric field, electrostrictive force, corona wind

Recenzent: prof. dr hab. Zbigniew Burski