

Andrzej RYBICKI

e-mail: andrzej.rybicki@put.poznan.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Optymalizacja hybrydowego procesu suszenia. Symulacja komputerowa

Wstęp

Suszenie w polu mikrofalowym różni się od klasycznego suszenia konwekcyjnego sposobem dostarczania ciepła do materiału suszonego. Objętościowy sposób nagrzewania jest z punktu widzenia termodyfuzyjnego transportu wilgoci korzystniejszy i przyspiesza proces wyprowadzania wilgoci z wnętrza materiału. Z drugiej strony, różnice w rozkładzie temperatury zwiększają wartości naprężeń powstających w suszonym materiale powodowanych zróżnicowanym rozkładem wilgoci [1]. Z prac doświadczalnych [2] wynika ponadto, że intensywność suszenia mikrofalowego w początkowym okresie suszenia jest większa niż w okresie, gdy wilgoci w materiale jest już mniej. Koniec okresu suszenia efektywniej przebiega w suszarce konwekcyjnej. W prezentowanej pracy pokazuje się, jak konstruować kombinowany proces łączący okresy suszenia mikrofalowego i konwekcyjnego. Rozwiązywano zagadnienia początkowo-brzegowe teorii suszenia dla różnych kombinacji warunków prowadzenia procesu i oceniano efektywność poszczególnych procesów.

Model matematyczny

Punktem wyjścia jest termomechaniczny model suszenia sformułowany przez Kowalskiego [3]. Odpowiedni układ równań opisujących zarówno pierwszy jak i drugi okres suszenia zbudowano dla walca. Zakłada się izotropię i jednorodność materiału suszonego oraz jednorodność czynnika suszącego i pola mikrofalowego. Analizę naprężeń w materiale suszonym przeprowadzono przy założeniu własności sprężystych materiału. Nie uwzględniono wpływu oksztalceń suszonego walca na proces wyprowadzania wilgoci. Wartości współczynników transportu wilgoci i ciepła a także własności mechanicznych materiału są funkcjami zawartości wilgoci i temperatury. Dla jednorodnego, symetrycznego walca o promieniu podstawy R i wysokości $2H$, suszonego w warunkach izotropowych, opis zjawisk transportu wilgoci, ciepła i oksztalceń jest dany czterema sprzężonymi równaniami różniczkowymi dla zmiennych przestrzennych $r \in (0, R)$ i $z \in (0, H)$:

$$\rho^s \dot{\theta} = \Lambda^l \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (c_T \vartheta + c_X \theta) - \varpi (c_T \vartheta + c_X \theta) \quad (1)$$

$$\dot{\vartheta} = D_T \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) - l \frac{\varpi}{\rho^s c_v} (c_T \vartheta + c_X \theta) \quad (2)$$

$$M \nabla^2 u_r + \frac{\partial}{\partial r} [(M+A)\varepsilon - (2M+3A)(\kappa^T \vartheta + \kappa^{(X)} \theta)] = M \frac{u_r}{r^2} \quad (3)$$

$$M \nabla^2 u_z + \frac{\partial}{\partial z} [(M+A)\varepsilon - (2M+3A)(\kappa^T \vartheta + \kappa^{(X)} \theta)] = 0 \quad (4)$$

Pierwsze równanie opisuje zmiany wilgoci z uwzględnieniem strumienia termodyfuzji i źródłowych członów aktywnych w drugim okresie suszenia. Drugie równanie opisuje ruch ciepła z członami źródłowymi produkcji ciepła w wyniku oddziaływania pola mikrofalowego. Równanie trzecie i czwarte opisują przemieszczenia w suszonym walcu, następujące pod wpływem zmian lokalnych zawartości wilgoci i temperatury. Układ powyższy uzupełniono warunkami brzegowymi opisującymi konwekcyjne wymiany wilgoci i ciepła na brzegu walca:

$$-\Lambda^l \text{grad}(c_T \vartheta + c_X \theta) \Big|_{\partial B} \cdot \mathbf{n} = \alpha_m (\mu^y \Big|_{\partial B} - \mu_a) \quad (5)$$

$$\Lambda_T \text{grad} \vartheta \Big|_{\partial B} \cdot \mathbf{n} = \alpha_T (\vartheta \Big|_{\partial B} - \vartheta_a) - l \alpha_m (\mu^y \Big|_{\partial B} - \mu_a) \quad (6)$$

W warunku (6) ostatni składnik oznacza ciepło zużywane na odparowanie strumienia wody z brzegu walca (l oznacza ciepło parowania). Warunki brzegowe dla równań przemieszczeniowych zawierają brak obciążeń na powierzchniach zewnętrznych oraz brak przemieszczeń ($u_r=0$) dla $r=0$ i ($u_z=0$) $z=0$, co jest konsekwencją symetrii zagadnienia. Naprężenia σ_{ij} w materiale suszonym wywołane zmianami pól temperatury (ϑ) i zawartości wilgoci (θ) oblicza się ze związku:

$$\sigma_{ij} = 2M\varepsilon_{ij} + [A\varepsilon - (2M+3A)(\kappa^T \vartheta + \kappa^{(X)} \theta)] \delta_{ij} \quad (7)$$

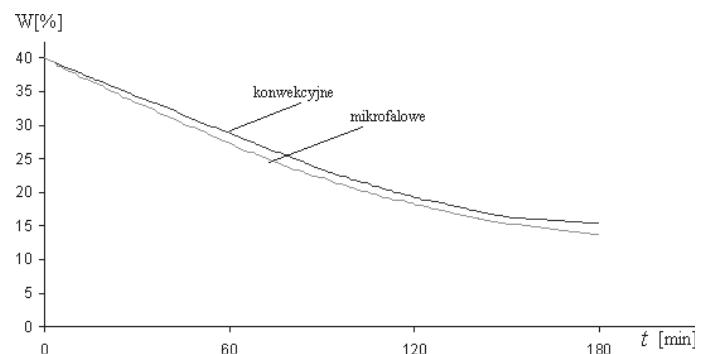
gdzie $\varepsilon = \varepsilon_{ij}$ oznacza część kulistą tensora odkształcenia, M i A są modułami odkształceń postaciowych i objętościowych, współczynniki $\kappa^{(T)}$ i $\kappa^{(X)}$ opisują termiczną i wilgotnościową rozszerzalność materiału, a δ_{ij} oznacza tensor jednostkowy. Zgodnie z hipotezą energetyczną odpowiedzialne za zniszczenie materiału są naprężenia zredukowane [4]:

$$\sigma_{red} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + (\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + 6\sigma_{rz}^2} \quad (8)$$

Układ czterech nieliniowych równań różniczkowych sprzężonych rozwiązuje się metodą elementów skończonych dla pochodnych względem zmiennych przestrzennych i różnic skończonych dla pochodnych po czasie.

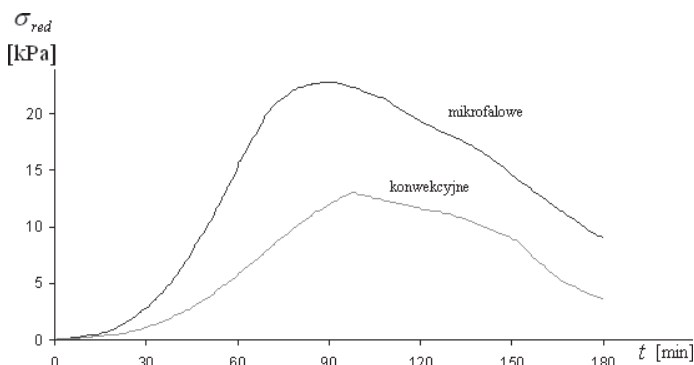
Porównanie suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego

Zadania suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego policzono dla walca o wysokości $2H=0,06$ m, promieniu podstawy $R=0,03$ m i początkowej zawartości wilgoci 40%. Przyjęto stałe materiałowe dla kaolinu KOC inne stałe jak w pracy [5]. Dla zadania symulacji suszenia konwekcyjnego przyjęto temperaturę czynnika suszącego 90°C i wilgotność względną 20%. Dla suszenia mikrofalowego przyjęto stałe parametry czynnika suszącego: temperatura 25°C i wilgotność względną 20%, natomiast moc źródła emitującego promieniowanie mikrofalowe 200 W. Efektywność obu procesów suszenia można ocenić, porównując krzywe suszenia otrzymane w wyniku symulacji trzech godzin procesu suszenia, które są przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Krzywe suszenia dla porównywanych symulacji suszenia

Na rys. 2 przedstawiono zmiany maksymalnych naprężeń zredukowanych, występujących w suszonym walcu podczas procesu suszenia. Na podstawie obu powyższych wykresów można zauważyć, że co prawda w procesie suszenia mikrofalowego obserwuje się szybszą ewakuację wilgoci z materiału suszonego, ale towarzyszą temu procesowi większe naprężenia i co za tym idzie możliwość uszkodzenia suszonego materiału jest bardziej prawdopodobna.

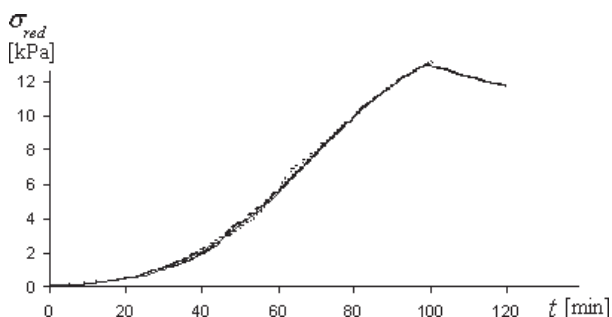


Rys. 2. Maksymalne naprężenia zredukowane dla porównywanych symulacji suszenia

Hybrydowy proces suszenia

Czy można tak skonstruować proces, łącząc okresy suszenia w suszarce konwekcyjnej i komorze mikrofalowej, aby polepszyć efektywność tego procesu? Podjęto próbę odpowiedzi na tak postawione pytanie. Przeprowadzono symulacje dwugodzinne procesu suszenia. Czas trwania procesu podzielono na osiem piętnastominutowych odcinków. W każdym z tych odcinków próbka mogła być suszona albo w komorze mikrofalowej albo w suszarce konwekcyjnej. Jest zatem 2^8 różnych sposobów poprowadzenia takiego hybrydowego suszenia. Konkretny proces wygodnie jest zapisać za pomocą ośmiowyrazowych ciągów zerojedynkowych. Jedynka na k -tym miejscu w takim ciągu oznacza: w k -tym kwadransie suszenie odbywa się w komorze mikrofalowej, zero – w suszarce konwekcyjnej. Przeprowadzono symulację wszystkich możliwych kombinacji procesów. Parametry procesów składowych są takie same jak w zadaniach opisywanych w poprzednim paragrafie. Po zapisaniu wyników tych symulacji można wybrać taki proces, który będzie najlepiej realizował zadanie maksymalizacji konkretnej funkcji celu.

Jeżeli kryterium dobroci procesu będzie minimalizacja naprężeń towarzyszących procesowi suszenia, to wówczas trzy najlepsze programy procesu suszenia to takie, które opisują ciągi: 01000000, 00100000, 00010000. Procesy, którym towarzyszą najmniejsze naprężenia przebiegają niemal w całości w suszarce konwekcyjnej, a jedynie na jeden z kwadransów (drugi, trzeci lub czwarty) próbka jest przenoszona do komory mikrofalowej. Na rys. 3 pokazano przebiegi maksymalnych naprężeń zredukowanych w tych procesach. Różnice w wartościach naprężeń obliczonych dla procesów różnią się bardzo nieznacznie i trudno zauważyć tę różnicę na wykresie. Co więcej, maksymalne naprężenia zredukowane dla zwykłego procesu suszenia konwekcyjnego są większe od tych z „najlepszego” procesu hybrydowego o 0,06 kPa.

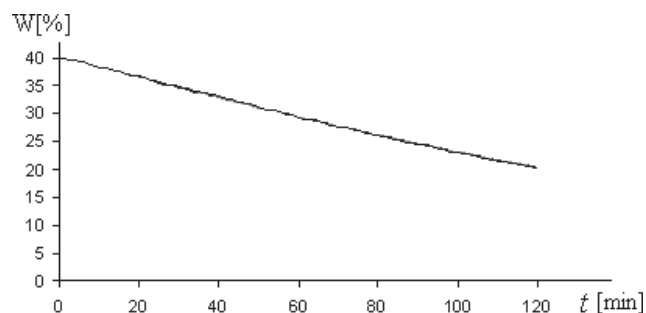


Rys. 3. Maksymalne naprężenia zredukowane dla trzech najlepszych procesów hybrydowych – kryterium najmniejszych naprężeń

Jeżeli przyjmiemy za kryterium jakości procesu ilość wilgoci wyprowadzoną z suszonej próbki w czasie symulacji, to wówczas trzy najlepsze programy procesu suszenia to takie, które opisują ciągi: 10111111, 11011111, 11101111.

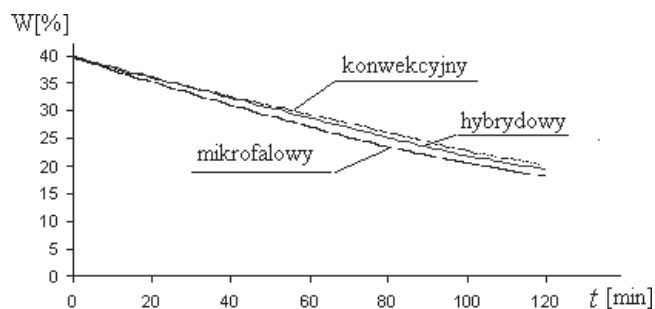
Można również spróbować sformułować bardziej złożone kryterium dobroci procesu suszenia. Często poszukiwany jest taki proces, który będzie najszybszy, a jednocześnie nie narazi suszonego materiału na zniszczenia. Dla przykładu postawiono zadanie znalezienia takiego

programu kombinacji suszenia konwekcyjno-mikrofalowego, który w czasie dwóch godzin procesu suszenia pozwoli wyprowadzić z suszonej próbki walcowej maksymalną ilość wody nie powodując jednocześnie większych naprężeń niż pewna dopuszczalna wartość. Wartość taką można wyznaczyć wykonując badania wytrzymałościowe dla danego materiału. Najlepsze programy suszenia hybrydowego przy założeniu, że maksymalne naprężenia zredukowane nie mogą przekroczyć wartości 17 kPa są opisane ciągami: 01111101, 01111011, 01110101.



Rys. 4. Krzywe suszenia dla trzech najlepszych procesów hybrydowych – kryterium najszybszego suszenia

Na rys. 5 porównano krzywe suszenia dla procesów czystego konwekcyjnego, czystego mikrofalowego oraz hybrydowego optymalnego z dodatkowym warunkiem o nie przekraczaniu przez maksymalnych naprężeń zredukowanych wartości 17 kPa.



Rys. 5. Porównanie szybkości suszenia dla procesów czystego mikrofalowego, czystego konwekcyjnego i hybrydowego optymalnego gdy wybiera się proces, w którym maksymalne naprężenia zredukowane nie przekraczają zadanej wartości

Wnioski

Kombinowane procesy suszenia pozwalają na ulepszenie procesu suszenia w porównaniu z procesem suszenia konwekcyjnym lub procesem mikrofalowym. Dzięki połączeniu dwóch sposobów suszenia można uzyskać proces suszenia o lepszych własnościach: wyprowadzanie wilgoci jest szybsze, a naprężenia w materiale suszonym są mniejsze. Metoda modelowania numerycznego jest przydatna do poszukiwania optymalnych programów takiego kombinowanego procesu, ponieważ pozwala na dowolną konfigurację kryteriów dobroci procesu.

LITERATURA

- [1] S. J. Kowalski K. Rajewska A. Rybicki: Fizyczne podstawy suszenia mikrofalowego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005.
- [2] B. Mielniczuk: Modelowanie matematyczne i badania doświadczalne rozwoju naprężeń w materiałach suszonych konwekcyjnie i mikrofalowo Praca doktorska, Politechnika Poznańska 2007.
- [3] S. J. Kowalski: Thermomechanics of drying processes, Springer Verlag, Berlin, New York. 2003
- [4] S. J. Kowalski A. Rybicki: Drying Technology, **27**, 863 (2009).
- [5] G. Banaszak, S. J. Kowalski, A. Rybicki Damage Analysis of Microwave Dried Materials, IDS 2010. Magdeburg, Germany, 3-6 October 2010.

Praca została wykonana w ramach projektu DS. 32-127/10 finansowanego przez Politechnikę Poznańską.