

PIOTR P. LEWICKI, DOROTA WITROWA-RAJCHERT, ARTUR SAWCZUK

SUSZENIE KONWEKCYJNE JABŁEK I MARCHWI WSPOMAGANE MIKROFALAMI

Streszczenie

W pracy badano kinetykę suszenia konwekcyjnego, mikrofalowego i konwekcyjno-mikrofalowego jabłek i marchwi. Energia mikrofalowa dostarczana była do materiału suszonego w sposób ciągły lub impulsowy. Uzyskane wyniki pokazały, że dostarczanie tej energii, niezależnie od sposobu, nie jest korzystne w przypadku materiału nieograniczonego. Suszenie mikrofalowe z przepływem powietrza o temperaturze pokojowej trwało dłużej niż suszenie konwekcyjne w temperaturze 70°C. Wspomaganie suszenia konwekcyjnego mikrofalami jest bardzo korzystne. Czas takiego procesu jest znacznie krótszy niż suszenia konwekcyjnego, a dostarczanie energii mikrofal w sposób impulsowy było korzystniejsze od sposobu ciągłego. Wszystkie przeprowadzone doświadczenia wykazały istotny wpływ właściwości materiału na przebieg procesu suszenia.

Wstęp

Promieniowanie elektromagnetyczne obejmuje zakresy częstości, reprezentujące różne formy energii, które mogą być wykorzystywane w procesie suszenia. Rozpoczynając od najwyższej częstości, co oznacza najkrótszą długość fali, są to: ultrafiolet, podczerwień, mikrofałe i fale radiowe. Wymienione formy energii charakteryzują się właściwościami, które potencjalnie czynią je atrakcyjnymi w aspekcie procesu suszenia i w niektórych przypadkach przewyższają konwencjonalne techniki. Porównując cztery zakresy promieniowania elektromagnetycznego, dwa z nich, tj. ultrafiolet i podczerwień, działają tylko na powierzchnię produktu, podczas gdy mikrofałe i fale radiowe ogrzewają materiał w całej jego objętości [7].

Pod pojęciem mikrofal rozumie się promieniowanie elektromagnetyczne o częstości od 300 MHz do 300 GHz [16], co odpowiada długości fali w zakresie od 1 mm do

1 m. Praktycznie do ogrzewania stosuje się promieniowanie o częstotliwości 915 i 2450 MHz. Podstawą ogrzewania przy wykorzystaniu mikrofal jest pochłanianie promieniowania przez materiał i zamiana go w ciepło. Istnieje wiele mechanizmów konwersji energii, ale dwa z nich są najważniejsze [17]. Pierwszy to polaryzacja dipolowa. Cząsteczki chemiczne będące dipolami (w żywności głównie woda, w mniejszym stopniu sole, tłuszcze i białka), w wyniku działania oscylującego pola elektrycznego fali elektromagnetycznej, ustawiają się zgodnie z kierunkiem i zwrotem tego pola. Podczas obrotów dipole uderzają w sąsiadujące z nimi cząsteczki, przekazując im nabytą od promieniowania energię. Drugi mechanizm pochłaniania promieniowania mikrofalowego opiera się na przewodnictwie jonowym. Jony, znajdujące się w ogrzewanym materiale, zaczynają się przemieszczać zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego i zderzając się z innymi cząsteczkami, powodują rozprzestrzenianie się energii cieplnej w materiale [3, 17].

W przemyśle spożywczym energia mikrofalowa ma zastosowanie przede wszystkim w procesach gotowania, pieczenia, rozmrażania i suszenia. Mikrofałe można stosować również do wytapiania tłuszczów, smażenia, blanszowania, pasteryzacji i sterylizacji [9, 17]. Coraz większe zainteresowanie przemysłowym wykorzystaniem mikrofal jest spowodowane możliwością znacznego skrócenia czasu trwania procesu technologicznego, czego powodem jest szczególnie mechanizm ich działania [6]. Z uwagi na dużą energochłonność suszenia, którego udział w bilansie energetycznym kraju oceniany jest na ponad 10% [22], w procesie tym coraz powszechniej stosuje się energię mikrofalową. Bardzo dobre rezultaty uzyskuje się przy suszeniu makaronu. W tym przypadku uzyskano ponad 70% skrócenie czasu poprzez wspomaganie mikrofalami suszenia konwekcyjnego [11], zmniejszenie o około 25% całkowitego zużycia energii i poprawę jakości produktu pod względem barwy, konsystencji i czystości mikrobiologicznej [18]. Wśród przemysłowych zastosowań promieniowania mikrofalowego można również wymienić suszenie kostek cukru, zastosowane pierwszy raz w Holandii w 1998 r. W stosunku do tradycyjnego (przy użyciu promieniowania podczerwonego), suszenie mikrofalowe trwa około 50% krócej i powoduje około 30% zmniejszenie zużycia energii, a także zmniejszenie o połowę przestrzeni zajmowanej przez aparaturę oraz obniżenie o około 20% temperatury materiału suszonego [19].

Wydaje się, że odpowiednim surowcem do suszenia przy zastosowaniu mikrofal są owoce i warzywa, mogące szybko i efektywnie absorbować energię mikrofalową, ze względu na dużą zawartość wody. Rzeczywiście, badania dotyczące tego procesu wykazują skrócenie czasów suszenia i poprawę jakości suszonych jabłek, gruszek i pieczarek [12], cebuli [8, 10], marchwi [14], bananów [4] i ziemniaków [1].

Technika mikrofalowej obróbki żywności, mimo niewątpliwych zalet, nie znalazła jak dotąd szerokiego zastosowania przemysłowego. Schiffman [17] podaje, że roczna światowa sprzedaż przemysłowych systemów wykorzystujących energię mikro-

falową ma wartość 15–25 milionów dolarów, przy 1,5–2 bilionach dolarów uzyskiwanych w samych Stanach Zjednoczonych ze sprzedaży domowych kuchni mikrofalowych. Przyczyn relatywnie małego zainteresowania przemysłu tą techniką jest kilka. Do najważniejszych należy brak, jak dotąd, wyjaśnienia sposobu oddziaływania mikrofal na składniki żywności. Nietypowa zmiana struktury cząsteczek cukrów i białek, aktywacja przynajmniej niektórych enzymów, zmiana konfiguracji aminokwasów z lewoskrętnej, charakterystycznej dla przyrody, na prawoskrętną, przemiany w budowie cząsteczek kwasów tłuszczowych, zachodzące poprzez fazę tworzenia wolnych rodników – to procesy, które ostatnio znajdują się głównie w sferze zainteresowań badaczy [20]. Wiadomo, że przebiegają one inaczej, a na pewno dużo szybciej podczas działania mikrofal. Mimo niemożności udzielenia odpowiedzi na wszystkie pytania oraz pewnej niechęci do wprowadzania innowacji w przemyśle wydaje się, że technika mikrofalowej obróbki żywności stanie się przyszłościową technologią przemysłu spożywczego. Warto więc kontynuować badania w tym zakresie, które umożliwią pełniejsze i dokładniejsze porównanie techniki mikrofalowej z konwencjonalnymi metodami.

Celem niniejszej pracy było porównanie procesu suszenia konwekcyjnego, mikrofalowego oraz konwekcyjno-mikrofalowego jabłek i marchwi oraz określenie wpływu parametrów procesu (ciągła i impulsowa emisja mikrofal) na jego kinetykę.

Material i metody badań

Surowiec do badań stanowiły jabłka odmiany Idared i marchew odmiany Flacoro o średniej zawartości suchej substancji odpowiednio $12,69 \pm 0,64\%$ i $11,06 \pm 0,94\%$. Materiał doświadczalny myto, obierano i krojono w sześciany o boku 10 mm oraz układano na sicie suszarki w pojedynczej warstwie, stosując załadunek około $3,5 \text{ kg/m}^2$ powierzchni sita.

Suszarka przystosowana do suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego wyposażona była w dwa wentylatory o łącznej wydajności $9 \text{ m}^3/\text{min}$, ogrzewacz oporowy powietrza o łącznej mocy 8 kW i magnetron zasilany ze źródła poza suszarką. Częstota generowanych mikrofal wynosiła 2450 MHz, a maksymalna moc emisji 600 W, z możliwością jej płynnej regulacji. Suszarka wyposażona była w wagę o dokładności 0,1 g. Jednorazowy załadunek suszarki wynosił około 500 g. Pomiar masy suszonego materiału odbywał się w sposób ciągły i był rejestrowany w pamięci komputera. Wszystkie eksperymenty były wykonywane w trzech powtórzeniach.

Realizację eksperymentów prowadzono w pięciu wariantach o następujących parametrach:

- wariant A – suszenie konwekcyjne: prędkość przepływu powietrza 1,8 m/s, temperatura powietrza suszącego 70°C ,
- wariant B – suszenie mikrofalowe: ciągła emisja mikrofal o mocy 250 W, prędkość przepływu powietrza 1,8 m/s, temperatura powietrza suszącego równa temperatu-

rze otoczenia (około 20°C),

- wariant C – suszenie mikrofalowe: impulsowa emisja mikrofal o mocy 500 W, co 30 s, przez 30 s, prędkość przepływu powietrza 1,8 m/s, temperatura powietrza suszącego równa temperaturze otoczenia (około 20°C),
- wariant D – suszenie konwekcyjno-mikrofalowe: ciągła emisja mikrofal o mocy 250 W, prędkość przepływu powietrza 1,8 m/s, temperatura powietrza suszącego 70°C,
- wariant E – suszenie konwekcyjno-mikrofalowe: impulsowa emisja mikrofal o mocy 500 W, co 30 s, przez 30 s, prędkość przepływu powietrza 1,8 m/s, temperatura powietrza suszącego 70°C.

Zawartość suchej substancji w materiale surowym i suszu oznaczano metodą suszenia, według PN-90/A-75101.

Do obliczeń zmian zawartości wody w drugim okresie suszenia wykorzystano równanie, będące pierwszym wyrazem szeregu stanowiącego rozwiązanie równań nieustalonego przenoszenia masy, zgodnie z drugim prawem Ficka i regułą Newmana:

$$\frac{u_{\tau} - u_r}{u_k - u_r} = B \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (1)$$

Z równania (1) obliczono szybkość suszenia:

$$\frac{du_{\tau}}{d\tau} = -K \cdot B \cdot (u_k - u_r) \cdot \exp(-K \cdot \tau), \quad (2)$$

a także względną szybkość suszenia:

$$\frac{\left. \frac{du_{\tau}}{d\tau} \right|_w}{\left. \frac{du_{\tau}}{d\tau} \right|_c} = \frac{K_w \cdot B_w (u_{kw} - u_{rw})}{K_c \cdot B_c (u_{kc} - u_{rc})} \exp(K_c \tau_c - K_w \tau_w) \quad (3)$$

W powyższych wzorach stosowano następujące oznaczenia:

B – stała,

K – współczynnik suszarniczy, min^{-1} ,

u – zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s.}$,

τ – czas, s.

Indeksy dolne:

o – początkowy,

c – konwekcyjny,

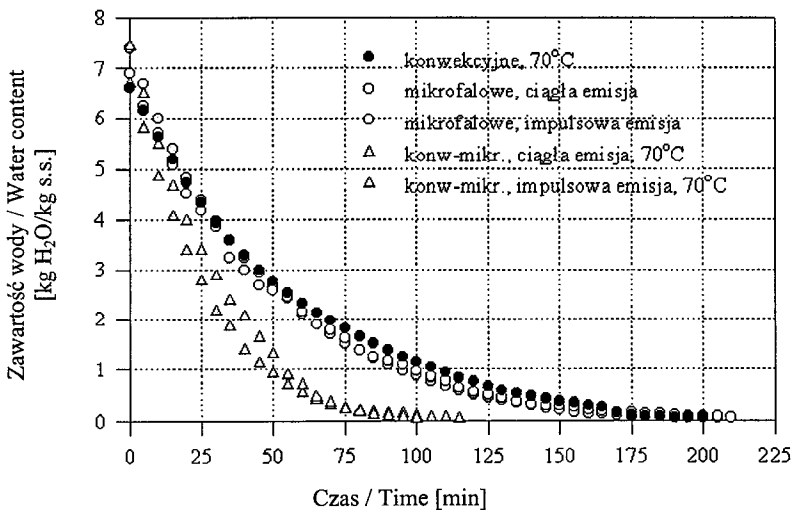
k – krytyczny,

r – równowagowy,
 w – w danym wariancie,
 τ – po czasie τ .

Wyniki i dyskusja

Suszenie jabłek

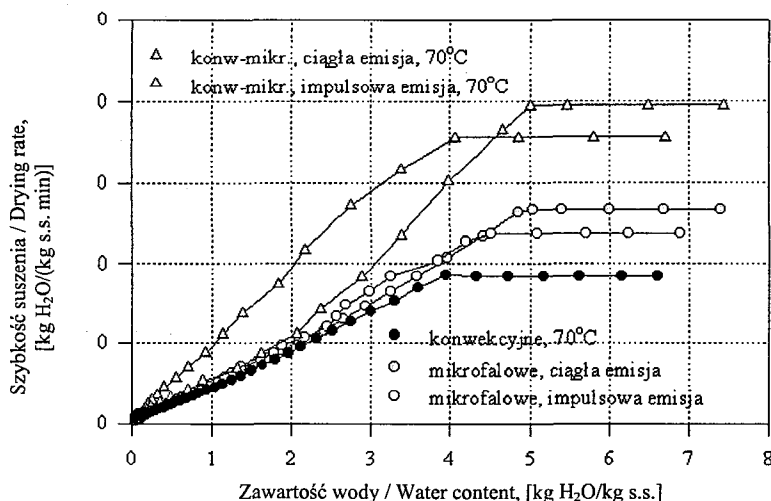
Jabłka pokrojone w 1 cm kostkę, suszone konwekcyjnie, miały końcową wilgotność bliską 10%. Czas osiągnięcia tej wilgotności wynosił 187 min (rys. 1). Usuwanie z nich wody przebiegało w dwóch etapach: przy stałej szybkości i malejącej szybkości suszenia (rys. 2). Krytyczna zawartość wody wynosiła 4,33 kg H₂O/kg s.s., co oznacza, że w okresie stałej szybkości suszenia zostało usunięte blisko 35% całej ilości odparowanej wody. Pierwszy okres suszenia trwał około 25 min, a jego szybkość wynosiła 0,0921 kg H₂O/(kg s.s. min). Przebieg krzywej szybkości suszenia był typowy dla ciała kapilarno-koloidalno-porowatego.



Rys. 1. Krzywe suszenia jabłek.

Fig. 1. Drying curves for apple cubes.

Zastosowanie mikrofal o mocy 250 W do suszenia kostek jabłka wydłużyło czas tego procesu do 201 min. Suszenie odbywało się w dwóch okresach, przy czym szybkość w pierwszym okresie była o blisko 45% większa niż suszenia konwekcyjnego. Krytyczna zawartość wody wynosiła 5,04 kg H₂O/kg s.s. W pierwszym okresie usunięto z suszonego materiału ponad 30% całej ilości odparowanej wody.



Rys. 2. Krzywe szybkości suszenia jabłek.

Fig. 2. Drying rate curves for apple cubes.

Energia mikrofal o mocy 500 W dostarczana w postaci 30 s impulsów prowadziła do wydłużenia czasu suszenia w porównaniu z czasem suszenia konwekcyjnego, a także suszenia z ciągłym dostarczaniem energii mikrofal. Suszenie kostek jabłka w wariancie C trwało 215 min, czyli było o 15% dłuższe od suszenia konwekcyjnego. Jednak ten sposób doprowadzania energii nie był równoważny ciągłemu dostarczaniu energii mikrofal o mocy 250 W. Z krzywych szybkości suszenia badanego materiału wynika, że krytyczna zawartość wody była w nim niższa aniżeli w wariancie B i wynosiła 4,50 kg H₂O/kg s.s. Szybkość suszenia w pierwszym okresie wynosiła 0,1180 kg H₂O/(kg s.s./min) i była o 12% mniejsza od uzyskanej przy ciągłym dostarczaniu energii mikrofal.

Suszenie konwekcyjne, wspomagane energią mikrofal dostarczaną w sposób ciągły, (wariant D) trwało tylko 110 min. W porównaniu z suszeniem konwekcyjnym, czas procesu uległ skróceniu o ponad 40% i w pierwszym jego okresie wynosił 15 min, a odparowaniu ulegało blisko 40% wody. Natomiast krytyczna zawartość wody wynosiła 4,06 kg H₂O/kg s.s., a szybkość jej usuwania osiągnęła 0,1774 kg H₂O/(kg s.s. min) i była o ponad 90% większa niż przy suszeniu konwekcyjnym.

Suszenie konwekcyjne, wspomagane energią mikrofal dostarczaną w sposób przerywany, trwało jeszcze krócej niż z ciągłym dostarczaniem energii mikrofal, a jego czas wynosił 100 min i był prawie o połowę krótszy niż w przypadku suszenia konwekcyjnego. Krytyczna zawartość wody wynosiła 5,00 kg H₂O/kg s.s., a szybkość

suszenia w pierwszym okresie 0,1970 kg H₂O/(kg s.s. min) i była wyższa aniżeli w procesie, w którym energię mikrofal dostarczano w sposób ciągły. W okresie tym odparowano 33% wody.

Drugi okres, który trwał od 190 do 90 min, w zależności od sposobu dostarczania energii, charakteryzował się wykładniczą zależnością pomiędzy zawartością wody a czasem suszenia. Współczynniki determinacji zawierały się w granicach od 0,9688 do 0,9989 i świadczyły o dobrym dopasowaniu równania (1) do danych eksperymentalnych. Obliczone współczynniki suszarnicze (tab. 1) różnią się istotnie statystycznie, a ich wartości obarczone są błędem w granicach $\pm 2 \div \pm 5\%$.

Tabela 1

Współczynniki suszarnicze jabłek.

Drying coefficients for apple cubes.

Wariant	K, min ⁻¹
A	0,01906
B	0,02374
C	0,02140
D	0,04524
E	0,04992

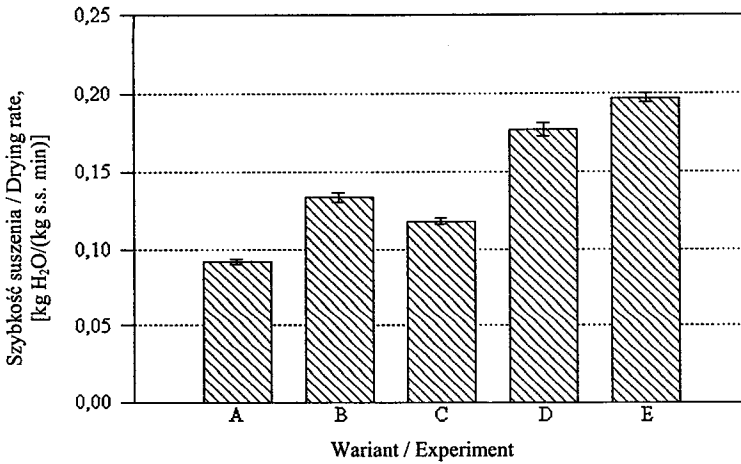
Z powyższych danych wynika wyraźnie, że zastosowanie energii mikrofal w postaci emisji ciągłej czy impulsowej istotnie wpływa na przebieg procesu suszenia. Największy efekt uzyskano wspomagając suszenie konwekcyjne mikrofalami. Szybkość suszenia w pierwszym okresie uległa istotnemu zwiększeniu, ale wydaje się, że ilość odparowanej wody (rys. 3) w tym okresie była niezależna od sposobu dostarczania energii i wynosiła od 30 do 40%.

Krytyczna zawartość wody wydaje się być istotnie zależna od jej zawartości początkowej i im ta ostatnia jest większa, tym jest wyższa krytyczna zawartość wody (rys. 4).

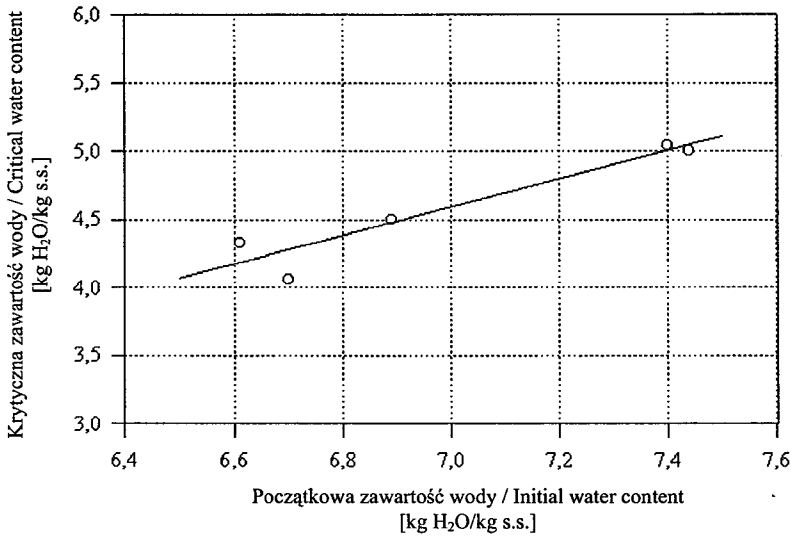
Blisko dwukrotne zwiększenie szybkości w pierwszym okresie suszenia, jak i ponad dwukrotny wzrost stałej suszarniczej spowodowały, że suszenie konwekcyjne wspomagane mikrofalami trwało blisko dwukrotnie krócej niż samo suszenie konwekcyjne kostek jabłek w temperaturze 70°C.

Na podstawie wyników z tabeli 1. i rys. 3. można wnioskować, że impulsowe dostarczanie energii mikrofal jest korzystne tylko w przypadku równoczesnego dostarczania ciepła poprzez konwekcję. Gdy materiał nie jest ogrzewany konwekcyjnie, to impulsowy sposób dostarczania energii mikrofal daje gorszy efekt niż emisja ciągła,

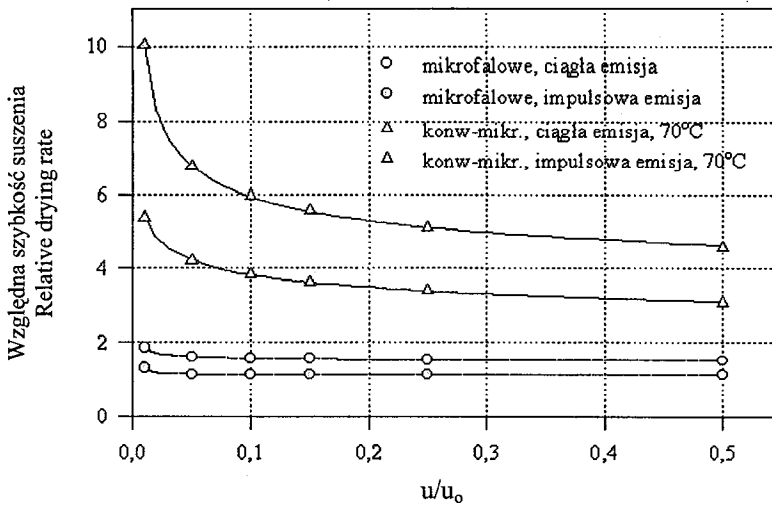
choć ilość dostarczonej energii w ciągu 1 min jest taka sama. Efekt ten jest szczególnie widoczny w końcowych etapach suszenia (rys. 5).



Rys. 3. Szybkość suszenia jabłek w pierwszym okresie suszenia.
Fig. 3. Drying rates of apple cubes in the first period of drying.



Rys. 4. Krytyczna zawartość wody w zależności od początkowej zawartości wody w jabłkach.
Fig. 4. Relationship between critical water content and initial water content in apples.



Rys. 5. Wpływ stopnia wysuszenia na względne szybkości suszenia jabłek.

Fig. 5. Influence of degree of dryness on relative drying rates of apple cubes.

Odnosząc szybkość suszenia kostek jabłek, przy danej zawartości wody, do szybkości suszenia konwekcyjnego przy tej samej wilgotności materiału (względna szybkość suszenia) można zaobserwować, że stosunek ten jest tym wyższy, im więcej wody odparowano z materiału (rys. 5). Ponadto, dostarczanie energii mikrofal do materiału nieograniczone powoduje, że względna szybkość suszenia utrzymuje się na stałym poziomie, aż do usunięcia 85–90% wody. W przypadku procesu z ciągłym dostarczaniem energii mikrofal, szybkość ta wynosi około 1,55 (wariant B), a przy impulsowym jej dostarczaniu tylko 1,15 (wariant C). Przy ogrzaniu materiału obserwuje się ciągły wzrost względnej szybkości suszenia, w miarę usuwania z niego wody. Po usunięciu z kostek jabłek 99% wody, względne szybkości suszenia w wariantach od B do E wynosiły odpowiednio 1,87; 1,32; 5,38 i 10,05.

Suszenie marchwi

Kostki marchwi suszone w identycznych warunkach jak jabłka, wymagały dłuższego czasu do osiągnięcia wilgotności 10%. We wszystkich wariantach suszenia wystąpił pierwszy okres, który trwał około 15 min.

Marchew suszona konwekcyjnie w temperaturze 70°C, w pierwszym okresie suszenia oddawała wodę z szybkością 0,1252 kg H₂O/(kg s.s. min) i w tym czasie usunięto jej około 27%. Krytyczna zawartość wynosiła 5,31 kg H₂O/kg s.s., a czas suszenia do osiągnięcia wilgotności 10% wynosił 218 min.

Dostarczanie energii mikrofal w sposób ciągły przedłużyło czas suszenia do 286 min, tj. o ponad 30% w stosunku do suszenia konwekcyjnego. Szybkość suszenia w pierwszym okresie wynosiła 0,1940 kg H₂O/(kg s.s. min), a krytyczna zawartość wody była na poziomie 6,75 kg H₂O/kg s.s. W okresie tym usunięto 30% wody z materiału.

Impulsowe dostarczanie energii mikrofal jeszcze bardziej wydłużyło czas suszenia. Proces ten trwał 330 min do osiągnięcia wilgotności 10%, a więc o ponad 100 min dłużej niż suszenie konwekcyjne. Szybkość usuwania wody w pierwszym okresie wynosiła 0,1518 kg H₂O/(kg s.s. min). Krytyczna zawartość wody wynosiła 5,26 kg H₂O/kg s.s., a w czasie tym usunięto 30% wody z materiału.

Wspomaganie suszenia konwekcyjnego energią ciągłej emisji mikrofal spowodowało istotne skrócenie jego czasu do 169 min, a więc o 23%. Szybkość suszenia w pierwszym okresie wynosiła 0,2114 kg H₂O/(kg s.s. min), a krytyczna zawartość wody (4,83 kg H₂O/kg s.s.) odpowiadała 40% usuniętej wody z materiału. Natomiast suszenie konwekcyjne wspomagane impulsowym dostarczaniem energii mikrofal trwało o 35% krócej i wynosiło 142 min. W pierwszym okresie suszenia szybkość usuwania wody wynosiła 0,1922 kg H₂O/(kg s.s. min) i kończył się on przy zawartości 4,27 kg H₂O/kg s.s. W okresie tym usunięto 40% wody z materiału. Analiza statystyczna wykazała, że szybkość suszenia w pierwszym okresie, w wariantach D i E nie różni się istotnie.

Drugi okres suszenia był dobrze opisany równaniem (1), a współczynniki determinacji wynosiły od 0,9955 do 0,9992. Obliczone współczynniki suszarnicze zamieszczono w tab. 2.

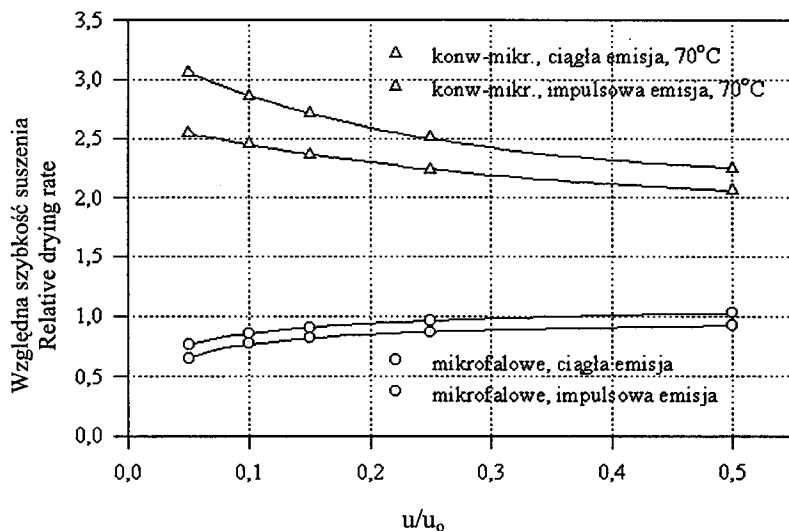
Tabela 2

Współczynniki suszarnicze marchwi.
Drying coefficients for carrot cubes.

Wariant	K, min ⁻¹
A	0,02075
B	0,02002
C	0,02220
D	0,03481
E	0,03927

Analiza wyników uzyskanych podczas suszenia marchwi wykazała, że wpływ energii mikrofal był znacznie mniejszy niż w przypadku jabłek. W drugim okresie stałe suszarnicze dla wariantów A i B nie różniły się statystycznie. Ponadto, względna szybkość suszenia przy ciągłym i impulsowym dostarczaniu energii mikrofal do nieogrzanego materiału ma wartość niższą od 1 (rys. 6), co świadczy, że, przy danej zawartości wody, szybkość suszenia konwekcyjnego jest wyższa niż suszenia mikrofalowego.

Natomiast przy ogrzonym materiale szybkość suszenia jest większa od 1. Jednak uzyskane wartości są znacznie niższe aniżeli w przypadku jabłek. Również zależność pomiędzy względną szybkością suszenia i zawartością wody w materiale jest znacznie słabsza niż obserwowano to w jabłkach.



Rys. 6. Wpływ stopnia wysuszenia na względne szybkości suszenia marchwi.

Fig. 6. Influence of degree of dryness on relative drying rates of carrot cubes.

Dyskusja wyników

Porównując konwekcyjne suszenia kostek obu badanych surowców można stwierdzić, że marchew suszy się szybciej niż jabłko, ale czas suszenia niezbędny do uzyskania tej samej końcowej wilgotności jest dłuższy w przypadku marchwi. Ten paradoksalny wniosek wynika z faktu, że ma ona inną początkową zawartość suchej substancji niż jabłko. Oznacza to, że aby uzyskać końcową wilgotność materiału na poziomie 10%, należało z marchwi usunąć średnio o 2,1% więcej wody niż z jabłek. W zasadzie nie jest to duża różnica, ale biorąc pod uwagę fakt, że rozkłada się ona na cały proces suszenia, w tym również na jego końcowe etapy, przedłużenie jego czasu jest istotne i wynosi ponad 16%.

Właściwości materiału suszonego w istotny sposób wpływają na przebieg suszenia z użyciem mikrofal, jako źródła energii. Ciągłe jej dostarczanie powoduje, tak w przypadku jabłek jak i marchwi, wzrost szybkości suszenia w pierwszym okresie. W przypadku jabłek zwiększenie to wynosi blisko 45%, a marchwi 55%. W pierwszym okresie suszenia odparowaniu ulega około 30% wody z obu surowców. W drugim

okresie suszenia występuje istotna różnica w zachowaniu się obu materiałów. Stwierdzono bowiem, że stała suszarnicza jabłek ogrzewanych mikrofalowo wzrastała o 25% w stosunku do suszenia konwekcyjnego. Natomiast podczas suszenia marchwi nie wykazano statystycznie istotnych różnic. W rezultacie tego jabłka, przy niskich zawartościach wody, suszyły się szybciej przy ogrzewaniu mikrofalowym niż w procesie konwekcyjnym, a w przypadku marchwi obserwowano zależność odwrotną (rys. 5 i 6). Przy względnej zawartości wody 0,05, względna szybkość suszenia jabłek wynosiła 1,63, a marchwi 0,77.

Impulsowe dostarczanie energii mikrofal do materiału nieograniczonego jest niekorzystne zarówno w odniesieniu do jabłek, jak i marchwi, w porównaniu z emisją ciągłą. W tym przypadku stałe suszarnicze różniły się statystycznie od stałych uzyskanych dla ciągłej emisji mikrofal, a względne szybkości suszenia przy niskich wilgotnościach materiału były znacznie mniejsze. Przy względnej zawartości wody 0,05 względna szybkość suszenia jabłek wynosiła 1,16, a marchwi 0,66.

Wspomaganie suszenia konwekcyjnego energią mikrofal prowadziło do istotnego jego skrócenia, przy czym efekt ten ponownie uzależniony był od rodzaju materiału. W pierwszym okresie szybkość suszenia jabłek wzrosła o 93%, a marchwi o blisko 70%, w stosunku do suszenia konwekcyjnego. Stała suszarnicza jabłek wzrastała 2,37 razy, a marchwi 1,68 razy. Z danych tych wynika wyraźnie, że tkanka jabłka znacznie lepiej pobiera energię mikrofal niż tkanka marchwi, szczególnie przy niskich zawartościach wody. Przy względnej zawartości wody 0,05, względna szybkość suszenia jabłek wynosiła 4,21, a marchwi 2,55.

Dostarczanie energii mikrofal w postaci impulsów istotnie zwiększało szybkość suszenia konwekcyjnego. W pierwszym okresie wzrosła ona w porównaniu z procesem ciągłej emisji mikrofal o 11% dla jabłek i nie różniła się statystycznie dla marchwi. W drugim okresie stała suszarnicza jabłek zwiększyła się o 10% a marchwi o blisko 13%. Przy niskich wilgotnościach materiału efekt impulsowego dostarczania energii był jeszcze bardziej widoczny, szczególnie w przypadku jabłek. Przy względnej zawartości wody 0,05 względna szybkość suszenia jabłka wzrosła o 60%, a marchwi o 20%, w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym wspomaganym ciągłą emisją mikrofal.

Obserwowane różnice w zachowaniu się kostek jabłka i marchwi w procesie suszenia najprawdopodobniej wynikają z różnej struktury materiału i jego morfologii. Jabłko zbudowane jest z komórek o średnicy 161–235 μm [15]. Z badań Drzewuckiej-Bujak [5] wynika, że 70% komórek jabłka ma średnicę poniżej 226 μm , a w przypadku jabłek odmiany Idared 85% komórek ma średnicę w przedziale 76–172 μm [13]. Jednocześnie tkanka tych owoców zawiera wiele przestrzeni międzykomórkowych, których objętość dochodzi do 20–25% [2]. Struktura jabłka jest luźna, porowata i łatwo przepuszczalna. Przestrzenie międzykomórkowe tworzą system kanałów, który umożliwia kapilarny przepływ cieczy i w miarę swobodny przepływ pary wodnej do po-

wierzchni materiału. Podczas suszenia jabłka kurczą się i pod koniec suszenia ich objętość wynosi około 27% objętości wyjściowej [21]. W rezultacie otrzymuje się materiał o porowatości przekraczającej 70%.

Marchew ma zupełnie inną strukturę niż jabłko. Komórki są mniejsze i bardziej upakowane, a 87% ma średnicę poniżej 150 μm [5]. Struktura jest zwarta z wyraźnie wydzielonymi wiązkami przewodzącymi. Z tego względu skurcz suszarniczy jest anizotropowy i dochodzi do 90%. W rezultacie porowatość wysuszonego materiału jest na poziomie 17% [21].

W procesie suszenia kostki jabłka tworzą otwartą, porowatą strukturę, łatwo przepuszczalną dla wody i pary wodnej, ale droga dyfuzji, w stosunku do kostki wyjściowej, zmniejsza się tylko o około 35%. W przypadku marchwi struktura suszu jest zwarta, mało porowata, a droga dyfuzji zmniejsza się o ponad 50%. Z rozwiązania drugiego równania Fick'a wynika, że strumień wody jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu wymiaru charakterystycznego materiału, a tym samym skrócenie drogi dyfuzji ma istotny wpływ na przebieg procesu suszenia.

Dane eksperymentalne dowodzą, że wspomaganie suszenia konwekcyjnego mikrofalami jest znacznie bardziej korzystne niż prowadzenie go tylko przy wykorzystaniu energii mikrofal. Efekt ten wynika z faktu, że energia mikrofal dostarczana jest głównie do cząsteczek wody, a otaczająca matryca w małym stopniu ulega ich działaniu. Cząsteczki wody poruszając się w kierunku powierzchni zderzają się między sobą i z otaczającą matrycą. Gdy temperatura matrycy jest niższa od ich temperatury, wtedy następuje transport ciepła i potencjał chemiczny cząsteczek wody maleje. W środowisku ogrzanym cząsteczki H_2O zderzając się z matrycą mogą pobierać część energii, przez co ich potencjał chemiczny będzie wzrastał lub nie będzie ulegał zmianie. Dlatego w środowisku ogrzanym wykorzystanie energii mikrofal na procesy transportu masy jest znacznie lepsze niż w środowisku nieogrzanym.

Struktura matrycy w istotny sposób będzie wpływać na wykorzystanie energii mikrofal w procesach transportu masy. Im jest bardziej zwarta i im jest więcej ścian komórkowych w jednostce objętości, tym będzie większe rozpraszanie energii i mniejszy stopień jej wykorzystania w procesach transportu. Wpływ mikrofal na proces suszenia marchwi jest mniejszy niż w przypadku jabłek, co potwierdza powyższy opis zjawiska.

Wnioski

1. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że właściwości surowca w istotny sposób wpływają na przebieg procesu suszenia konwekcyjnego, a także suszenia wspomaganego energią mikrofal. Wydaje się, że szczególnie istotna jest w tym przypadku struktura materiału, czyli wielkość komórek, ich rozkład przestrzenny i

- upakowanie. Struktura decyduje o oporach wewnętrznego ruchu masy i skurczu materiału w czasie suszenia.
2. Dostarczanie energii mikrofal w sposób ciągły lub impulsowy do nieograniczonego materiału okazało się niekorzystne w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że energia ta jest absorbowana głównie przez cząsteczki wody, które przemieszczając się w materiale oddają energię nieogrzanej matrycy. Znaczne jej rozpraszanie powoduje, że szybkość suszenia konwekcyjnego jest większa niż suszenia mikrofalowego.
 3. Wspomaganie suszenia konwekcyjnego energią mikrofal jest bardzo korzystne, ponieważ następuje istotne jego skrócenie, a dostarczanie energii mikrofal w sposób impulsowy jest wydajniejsze niż w sposób ciągły. Energia mikrofal absorbowana przez cząsteczki wody nie jest tracona na rzecz ogrzanej matrycy, a tym samym proces transportu masy jest szybszy w porównaniu z tym, jaki występuje w czasie suszenia konwekcyjnego. Mimo znacznego przyspieszenia suszenia, różnice pomiędzy kinetyką usuwania wody z kostek jabłka i marchwi są w dalszym ciągu istotne, co potwierdza wpływ struktury materiału na przebieg procesu.

LITERATURA

- [1] Bouraoui M., Richard P., Durance T.: Microwave and convective drying of potato slices. *J. Food Process Engng*, **17**, 1994, 353.
- [2] Bourne M.C.: Texture of fruits and vegetables. Rheology and texture in food quality. *Food Technol.*, **28**, 1974, 274.
- [3] Decareau R.V.: *Microwaves in the food processing industry*. Academic Press Inc., Orlando, Florida 1985.
- [4] Drouzas A.E., Schubert H.: Microwave application in vacuum drying of fruits. *J. Food Engng.*, **28**, 1996, 203.
- [5] Drzewucka-Bujak: Wpływ procesu suszenia na zmiany struktury materiału. Praca magisterka. Wydział Technologii Żywności, SGGW, Warszawa 1997.
- [6] Giese J.: Advances in microwave food processing. *Food Technol.*, **46**, 1992, 118.
- [7] Jones P.L.: Electromagnetic wave energy in drying processes. *Drying'92* (ed. A.S. Mujumdar), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1992, part A, 114.
- [8] Laguerre J.C., Tauzin V., Grenier E.: Hot air and microwave drying of onions: a comparative study. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium. Drying'98* (eds. C.B. Akritidis, D. Marinou-Kouris, G.D. Saravacos, A.S. Mujumdar), Ziti Editions, Thessaloniki 1998, v.B, 1280.
- [9] Lenart A., Łakomic D.: Najnowsze kierunki zastosowania mikrofal w przemyśle spożywczym. *Przem. Spoż.*, **46**, 1992, 283.
- [10] Lewicki P.P., Witrowa-Rajchert D., Pomarańska-Łazuka W., Nowak D.: Rehydration properties of dried onion. *Int. J. Food Properties*, **1**, 1998, 275.
- [11] Nitz M., Leonhardt G.F., Marsaioli Jr. A.: Microwave assisted drying of short cut pasta. *Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS'2000* (eds. P.J.A.M. Kerkhof, W.J. Coumans, G.D. Mooiweer). Elsevier Science, Amsterdam 2000, Paper No 107.

- [12] Pappas C, Tsami E., Vlachopanagiotou V., Marinos-Kouris D.: The rehydration kinetics of microwave dehydrated fruits. The role of the process conditions. Proceedings of the 11th International Drying Symposium. Drying'98 (eds. C.B. Akritidis, D. Marinos-Kouris, G.D. Saravacos, A.S. Mujumdar), Ziti Editions, Thessaloniki 1998, v.B, 1115.
- [13] Porzecka-Pawlak G.: Zmiany struktury jabłek wywołane procesem odwadniania osmotycznego. Praca magisterka. Wydział Technologii Żywności, SGGW, Warszawa 1999.
- [14] Prabhanjan D.G., Ramaswamy, H. S., Raghavan, G. S. V.: Microwave-assisted convective air drying of thin layer of carrots. *J. Food Engng.*, **25**, 1995, 283.
- [15] Reeve R.M.: Histological investigation of texture in apples. II. Structure and intercellular spaces. *Food Res.*, **19**, 1953, 604.
- [16] Rynnänen S.: The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles. *J. Food Engng.*, **26**, 1995, 409-429.
- [17] Schiffman R.F.: Microwave and dielectric drying. Handbook of Industrial Drying (ed.A.S. Mujumdar). Marcel & Dekker Inc., New York 1995, 345.
- [18] Steele R.J.: Microwaves in the food industry. *CSIRO Food Research Quarterly*, **47**, 73.
- [19] Torringa H.M., Neijens H.P.M., Bartels P.V.: Novel process for the drying of sugar cubes applying microwave technology. Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS'2000 (eds. P.J.A.M. Kerkhof, W.J. Coumans, G.D. Mooiweer). Elsevier Science, Amsterdam 2000, Paper No 230.
- [20] Tyczkowski J.: Od sufitu do diamentu. *Wiedza i Życie*, **6**, 2000, 24.
- [21] Witrowa-Rajchert D.: Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w materiale roślinnym w czasie suszenia. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa 1999.
- [22] Witrowa-Rajchert D.: Nowe metody usuwania wody z żywności. XXXI Sesja Naukowa KTiChŻ PAN, Referaty, Poznań 2000, 137.

CONVECTIVE DRYING OF APPLES AND CARROT ASSISTED WITH MICROWAVES

S u m m a r y

Kinetics of convective, microwave and convective-microwave drying was investigated in this work. Material subjected to drying was apple and carrot cut into 1 cm cubes. Microwave energy was supplied either continuously or in pulses. It was shown that drying done solely with microwave energy was not as efficient as convective drying. Microwave energy was supplied to material at room temperature and the drying was longer than convective drying at 70°C. Convective drying assisted with microwaves was fast and the drying time was much shorter than that observed for the sole convective drying. Microwave energy supplied in pulses was more efficient than that supplied continuously. In all experiments the effect of tissue properties on the drying kinetics was very evident. ☒