

OPTIMALIZACJA METODĄ PŁASZCZYZN ODPOWIEDZI SUSZENIA MIKROFALOWO-KONWEKCYJNEGO LIŚCI PIETRUSZKI PODDANYCH DZIAŁANIU ULTRADŹWIĘKÓW ORAZ OBRÓBCE PARĄ WODNĄ

Magdalena Dadan✉, Katarzyna Rybak, Małgorzata Nowacka,
Artur Wiktor, Dorota Witrowa-Rajchert

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy był wybór optymalnych parametrów przetwarzania liści pietruszki uwzględniających rodzaj obróbki wstępnej oraz temperaturę powietrza i moc mikrofal podczas suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego, przy założeniu maksymalnego skrócenia suszenia oraz uzyskania minimalnego zużycia energii. Zaprojektowano w tym celu doświadczenie trójczynnikiowe, w którym czynnikami zmiennymi były moc mikrofal (100, 200, 300 W), temperatura powietrza (20, 30, 40°C) i typ obróbki wstępnej (obróbka ultradźwiękami, obróbka parą wodną, moczenie). Liście pietruszki poddane zabiegom wstępnym suszono mikrofalowo-konwekcyjnie. Analizowano czas suszenia oraz całkowite właściwe zużycie energii (*TSEC*) do momentu osiągnięcia względnej zawartości wody (zredukowanej zawartości wody) wynoszącej $MR = 0,02$. Na podstawie otrzymanych wyników można było stwierdzić, iż wszystkie czynniki w istotny sposób wpłynęły na badane zmienne. Najkrócej trwało suszenie przy mocy 300 W i w temperaturze 40°C, poprzedzone zastosowaniem ultradźwięków. Obróbka parą wodną, pomimo skrócenia czasu suszenia w stosunku do materiału moczonego, charakteryzowała się dużą energochłonnością, przez co wartość *TSEC* w całym zakresie była większa niż w przypadku suszenia materiału moczonego. Badania wskazały, iż sonikacja może być z powodzeniem wykorzystana do wspomagania suszenia liści pietruszki. Ponadto metoda płaszczyzn odpowiedzi może być rozpatrywana jako cenne narzędzie do projektowania procesu suszenia.

Słowa kluczowe: liście pietruszki, ultradźwięki, obróbka parą wodną, suszenie, metoda płaszczyzn odpowiedzi

✉magdalena_dadan@sggw.pl

WSTĘP

Szacuje się, że suszenie zużywa 10–12% energii wykorzystywanej przez przemysł [Witrowa-Rajchert 2009]. Jest zatem procesem najbardziej energochłonnym spośród jednostkowych procesów w technologii żywności. Duże nakłady eksploatacyjne suszenia związane są z koniecznością zmiany stanu skupienia wody. Nie bez znaczenia jest również mała sprawność termiczna tradycyjnych suszarek konwekcyjnych, która przeważnie wynosi 40–60% [Witrowa-Rajchert 2009]. Nikogo nie dziwi zatem, że przemysł poszukuje obecnie nowoczesnych rozwiązań związanych między innymi z wykorzystywaniem zabiegów wstępnych przed procesem suszenia, które zmodyfikowałyby w taki sposób strukturę wewnętrzną materiału, aby woda odparowywała z większą intensywnością, co przełożyłoby się na oszczędność czasu oraz nakładów finansowych.

Konwencjonalnie, intensyfikowanie suszenia owoców i warzyw odbywa się za pomocą blanszowania wodą lub parą wodną. Wykorzystanie blanszowania do osiągnięcia tego celu związane jest z rozluźnieniem struktury materiału z powodu rozkładu pektyn, co skutkuje utratą jedności komórek [Guzek i in. 2012]. Skutkiem tego jest skrócenie suszenia [Nowacka i Witrowa-Rajchert 2011, Gamboa-Santos i in. 2013]. González-Fésler i inni [2008] zaobserwowali wzrost dyfuzyjności wody od wartości $0,333 \cdot 10^{-10}$ do $0,522 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ jako efekt blanszowania tkanki jabłka parą wodną przez 2 min, co odpowiadało 56-procentowemu wzrostowi intensywności suszenia.

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie nietermicznymi sposobami obróbki wstępnej surowca przed suszeniem. Wynika to z możliwości modyfikowania struktury tkankowej surowca, czego konsekwencją jest intensyfikacja procesu suszenia [Witrowa-Rajchert i in. 2014]. Wśród nietermicznych technologii wymienić można między innymi zastosowanie ultradźwięków (US, sonikację). Z fizycznego punktu widzenia ultradźwięki są formą energii przekazywaną przez falę ciśnieniową, powodującą vibracje powietrza o częstotliwości niesłyszalnej dla ucha ludzkiego. Inaczej mówiąc, jest to fala mechaniczna o zakresie częstotliwości od 18 kHz do 100 MHz [Kentish i Ashokkumar 2011, Nowacka i in. 2012, Witrowa-Rajchert i in. 2014].

Mechanizm oddziaływania ultradźwięków na komórki biologiczne jest bardzo złożony. Powstawanie różnych zjawisk, towarzyszących generowaniu ultradźwięków, uzależnione jest od wielu czynników, często ze sobą powiązanych. Zmiany wywołane w materiale w wyniku oddziaływania ultradźwięków można tłumaczyć występowaniem mechanizmu kawitacji, czyli powstawania, wzrostu i gwałtownego zanikania pęcherzyków gazu, które są tworzone, gdy ultradźwięki o wystarczająco dużej mocy są propagowane w medium ciekłym. Równie ważny jest tzw. efekt gąbki, czyli szybkie, naprzemienne ściskanie i rozprężanie materiału w wyniku przechodzenia fali akustycznej przez materiał stały oraz efekty towarzyszące kawitacji na granicy ciało stałe – ciecz [Witrowa-Rajchert 2009, Kentish i Ashokkumar 2011, Mason i in. 2011].

Obecnie prowadzone są badania laboratoryjne oraz o charakterze pilotażowym, dotyczące możliwości implementacji ultradźwięków w suszeniu żywności. Sonikacja jako obróbka wstępna była z powodzeniem zaaplikowana w badaniach laboratoryjnych w celu intensyfikowania procesu suszenia różnego rodzaju materiałów, między innymi: jabłek [Nowacka i in. 2012, Rodríguez i in. 2015, Fijałkowska i in. 2016], bananów [Azoubel i in. 2010], liści morwy białej [Tao i in. 2016] czy buraka [Fijałkowska i in. 2015]. Za-

stosowanie ultradźwięków jako obróbki wstępnej skróciło suszenie jabłek o 31–40% [Nowacka i in. 2012], a o 11–56% suszenie liści pietruszki [Śledź i in. 2014]. Suszenie konwekcyjne liści morwy białej niepoddanych obróbce wstępnej trwało 101,5 min, a po zastosowaniu sonikacji ($63 \text{ W} \cdot \text{l}^{-1}$, 10 min) – 74 min. Skróciło to łączny czas przetwarzania liści (czas obróbki + czas suszenia) o 17,2% [Tao i in. 2016].

Z racji ograniczonej liczby artykułów naukowych dotyczących wykorzystania ultradźwięków do wspomagania suszenia liści pietruszki, badania w tym zakresie należy uznać za zasadne. W związku z tym, celem pracy był wybór optymalnych parametrów przetwarzania liści pietruszki, uwzględniających rodzaj obróbki wstępnej, temperaturę powietrza oraz moc mikrofal podczas suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego, przy założeniu maksymalnego skrócenia suszenia oraz uzyskania minimalnego zużycia energii.

MATERIAŁ I METODY

Pietruszka naciowa (*Petroselinum crispum*) pochodziła z upraw hydroponicznych Swedeponic Polska Sp. z o.o. (Kraśnicza Wola). Rośliny kupowano w doniczkach i przechowywano przez maksymalnie dwa dni w temperaturze pokojowej ($20 \pm 1^\circ\text{C}$). Dojrzałe i zdrowe liście pietruszki zrywano bezpośrednio przed zabiegami wstępnymi (obróbką ultradźwiękami, obróbką parą wodną oraz moczeniem). Zawartość suchej substancji świeżych liści pietruszki wynosiła $14,94 \pm 0,60\%$.

Badania zaprojektowano według schematu doświadczenia trójczynnika, wykorzystującego metodę płaszczyzn odpowiedzi (ang. *response surface methodology* – RSM) z dwoma czynnikami ilościowymi oraz jednym jakościowym (Design-Expert v. 10, Stat-Ease Inc., USA). Wartości aktualne i zakodowane zestawiono w tabeli 1. Plan eksperymentu zakładał kombinację każdego czynnika na każdym poziomie z pięciokrotnym powtórzeniem w punkcie centralnym (0, 0) dla każdego typu obróbki wstępnej, co w sumie zakładało przeprowadzenie 39 doświadczeń.

Sonikację (US) liści pietruszki prowadzono w łaźni ultradźwiękowej (MKD Ultrasonic, MKD-3) przy częstotliwości 21 kHz przez 20 min. Stosunek masy surowca do masy wody wodociągowej wynosił 1:40. Temperatura wody zastosowanej do obróbki wynosiła $22,3 \pm 1,6^\circ\text{C}$, a jej wzrost po 20 min sonikacji wynosił 2°C .

Tabela 1. Wartości aktualne i zakodowane (w nawiasie) czynników w doświadczeniu trójczynnika

Table 1. Actual and standardized (in brackets) factors' values in three-factorial design

Czynnik Factor	Dolna wartość Low value	Centralna wartość Central value	Górna wartość High value
A: moc mikrofal microwave power [W]	100 (–1)	200 (0)	300 (+1)
B: temperatura powietrza air temperature [$^\circ\text{C}$]	20 (–1)	30 (0)	40 (+1)
C: wariant obróbki wstępnej type of pre-treatment [–]	ultradźwięki – ultrasound obróbka parą wodną – steaming moczenie – immersion		

W celu zapewnienia pełnego zanurzenia liści w wodzie materiał umieszczano na perforowanym sicie. Bezpośrednio po obróbce liście osuszono z nadmiaru wody.

Obróbkę parą wodną (PARA) przeprowadzono przez 3 s w pojedynczej warstwie, nad wrzącą wodą ($99 \pm 1^\circ\text{C}$). Bezpośrednio po obróbce wstępnej liście umieszczano na sicie i przenoszono do łaźni, gdzie chłodzono materiał w wodzie wodociągowej o temperaturze pokojowej przez 20 min (czas moczenia materiału był taki sam, jak podczas obróbki ultradźwiękami) przy stosunku masy materiału do masy wody wodociągowej wynoszącym 1:40. Po obróbce materiał odsączano.

W celu wyeliminowania wpływu przebywania liści w wodzie podczas sonikacji oraz po obróbce parą wodną, materiałem odniesienia były liście moczone (M) w wodzie wodociągowej o temperaturze pokojowej przez 20 min. Materiał po moczeniu był odsączany analogicznie, jak przy pozostałych zabiegach wstępnych.

Liście pietruszki poddane zabiegom wstępnym suszono w suszarce mikrofalowo-konwekcyjnej (Promis-Tech, Wrocław). Proces przeprowadzono przy zmiennej mocy mikrofal (100, 200 lub 300 W) i zmiennej temperaturze powietrza suszącego (20, 30 lub 40°C). Powietrze przepływało poprzecznie do warstwy materiału ze stałą prędkością wynoszącą $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Liście umieszczano na cylindrycznym sicie obrotowym, którego obciążenie wynosiło $0,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (co odpowiadało początkowej masie surowca wynoszącej 24 g).

Pobór energii elektrycznej w trakcie obróbki ultradźwiękami oraz suszenia analizowano za pomocą miernika Voltcraft Energy Logger 4000F (Hirschau, Niemcy) oraz zmodernizowanego miernika firmy Pawbol (Sułkowice, Polska). Zużycie energii w trakcie obróbki parą wodną zostało wyliczone i wyniosło 660,2 kJ [Dadan 2016]. Na tej podstawie wyliczano całkowite właściwe zużycie energii (*TSEC*), uwzględniające zużycie energii w trakcie obróbki wstępnej oraz suszenia, w przeliczeniu na 1 kg odparowanej wody.

Odpowiedzi czynników (czas suszenia oraz całkowite właściwe zużycie energii) były analizowane przy wykorzystaniu programu Design Expert 10. Do odpowiedzi dopasowywane były modele kwadratowe charakteryzujące się najlepszym dopasowaniem, które posłużyły do wyznaczenia płaszczyzn odpowiedzi. W przypadku czasu suszenia, z powodu stosunku wartości maksymalnej do minimalnej wynoszącego powyżej 10, konieczne było dokonanie transformacji wartości czasu suszenia. Przekształcenia dokonano według zależności:

$$y' = 1/\sqrt{(y+k)} \quad (1)$$

gdzie:

y – eksperymentalny czas suszenia [min],

k – stała (przyjęto $k = 3,7$).

Zarówno wieloczynnikowa analiza wariancji, jak i optymalizacja procesu suszenia (wybór najodpowiedniejszej obróbki, temperatury powietrza oraz mocy mikrofal) przeprowadzono z użyciem programu Design Expert. Optymalizacja zakładała najkrótszy czas suszenia oraz najmniejszą wartość *TSEC*.

WYNIKI I DISKUSJA

Równania modeli obrazujących płaszczyzny odpowiedzi czasu suszenia, uzależnione od temperatury powietrza i mocy mikrofal, wyznaczone oddzielnie w przypadku każdego wariantu obróbki wstępnej dla poddanych transformacji, aktualnych wartości (niewystandaryzowanych) czasu suszenia zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Równania płaszczyzn odpowiedzi dla wartości czasu suszenia, poddanej transformacji według równania 1

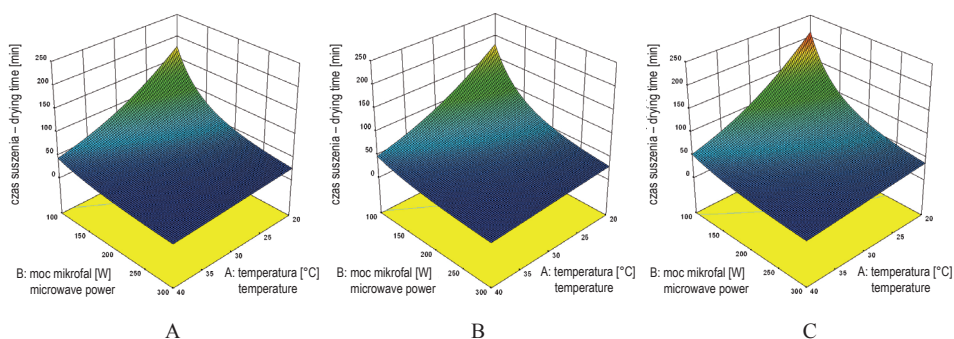
Table 2. Equations of response surfaces for drying time values that have been transformed based on Equation 1

Obróbka Treatment	Równania – Equations
US	$y' = -0,019430 - 4,17419 \cdot 10^{-4} \cdot \text{temperatura} + 8,58601 \cdot 10^{-4} \cdot \text{moc mikrofal} - 1,88825 \cdot 10^{-6} \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 6,81417 \cdot 10^{-5} \cdot \text{temperatura}^2 - 7,06013 \cdot 10^{-7} \cdot \text{moc mikrofal}^2$
PARA	$y' = -9,78043 \cdot 10^{-3} - 6,91580 \cdot 10^{-4} \cdot \text{temperatura} + 7,57544 \cdot 10^{-4} \cdot \text{moc mikrofal} - 1,88825 \cdot 10^{-6} \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 6,81417 \cdot 10^{-5} \cdot \text{temperatura}^2 - 7,06013 \cdot 10^{-7} \cdot \text{moc mikrofal}^2$
M	$y' = -0,011279 - 6,37000 \cdot 10^{-4} \cdot \text{temperatura} + 8,15476 \cdot 10^{-4} \cdot \text{moc mikrofal} - 1,88825 \cdot 10^{-6} \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 6,81417 \cdot 10^{-5} \cdot \text{temperatura}^2 - 7,06013 \cdot 10^{-7} \cdot \text{moc mikrofal}^2$

Powierzchnie odpowiedzi czasu suszenia do względnej zawartości wody wynoszącej 0,02 przedstawiono na rysunku 1. Na podstawie analizy wykresów można było stwierdzić, iż wraz ze wzrostem mocy mikrofal oraz temperatury powietrza suszenie trwało krócej, niezależnie od zastosowanej obróbki wstępnej. Czas suszenia był zróżnicowany w zakresie 12,5–228,0 min. Przykładowo materiał moczony był suszony przez 228 min (20°C, 100 W) do osiągnięcia względnej zawartości wody (zredukowanej zawartości wody) $MR = 0,02$, a w tej samej temperaturze przy mocy mikrofal 200 W – 58,0 min. Zatem dwukrotne zwiększenie mocy mikrofal skutkowało zredukowaniem czasu suszenia o 75%. Podobnie w rezultacie dwukrotnego podwyższenia temperatury powietrza (z 20 do 40°C) suszenie moczonych liści pietruszki prowadzone przy mocy mikrofal 100 W trwało 53 min, co oznacza o 77% krótszy proces. Ponadto w porównaniu z moczeniem cała płaszczyzna odpowiedzi czasu procesu była położona na wykresie niżej w przypadku sonikacji i obróbki parowej, co oznacza mniejszą czasochłonność suszenia w przypadku zastosowania tych zabiegów wstępnych. Tao i inni [2016] również zaobserwowali największe skrócenie suszenia, wynoszące 30%, przy zastosowaniu ultradźwiękowej obróbki wstępnej. Z kolei wstępna sonikacja buraka skróciła suszenie o 4–9% przy zastosowaniu częstotliwości 21 kHz przez 10–30 min [Fijałkowska i in. 2015]. Ultradźwięki aplikowane podczas zabiegu wstępnego przyczyniły się również do skrócenia suszenia jabłka o 31–40% [Nowacka i in. 2012], banana o 5–40% [Azoubel i in. 2010] oraz liści pietruszki o 11–56% [Śledź i in. 2014]. Według Schössler i innych [2012] oraz Jambrak i innych [2007], porowatość materiału ma kluczowe znaczenie w kontekście efektywności sonikacji. Tkanki owoców i warzyw mają odmienną budowę (głównie występujące miąższ zasadniczy) i bardziej porowatą strukturę niż liście roślin. Obecność kilku rodzajów tkanek w liściach, w tym w szczególności skórki wraz z kutykulą, chroniących

roślinę przed nadmierną transpiracją, prawdopodobnie stanowi dodatkowy opór podczas ultradźwiękowej obróbki. Zgodnie z informacjami zaprezentowanymi przez Angersbach i innych [2000], rozmiar komórek warunkuje odpowiedź tkanki na działanie innej nietermicznej obróbki wstępnej – pulsacyjnego pola elektrycznego. Prawdopodobne jest zatem, że znaczne zróżnicowanie wielkości komórek poszczególnych tkanek liści oraz występowanie przestrzeni powietrznych w miąższu palisadowym mogą mieć wpływ na efektywność oddziaływania ultradźwięków.

Zarówno moc mikrofal, jak i temperatura powietrza w podobny sposób wpłynęły na intensywność suszenia w przypadku wszystkich wariantów obróbki wstępnej. Największy wzrost intensywności suszenia (a zatem najbardziej „stromy” spadek czasu suszenia) zaobserwowano przy zwiększeniu temperatury z 20 do 30°C przy zastosowaniu mocy 100 W oraz przy zwiększeniu mocy mikrofal ze 100 do 200 W przy temperaturze 20°C. Dalsze zwiększanie mocy mikrofal i podwyższenie temperatury nie skutkowało już tak znacznym intensyfikowaniem suszenia, prawdopodobnie ze względu na to, iż część energii dostarczanej do materiału nie była efektywnie wykorzystywana do intensyfikowania procesu, gdyż opory dyfuzyjne przenoszenia masy ograniczały tę wymianę. Można przypuszczać, iż nadmiar energii mógł być przyczynkiem do częściowego przypalania produktu. Wzrost intensywności suszenia wraz ze zwiększeniem mocy mikrofal i/lub podwyższeniem temperatury powietrza zaobserwowano również w przypadku obróbki czosnku [Figiel 2009], mięty [Therdthai i Zhou 2009], liści pietruszki [Soysal i in. 2006], liści bazylii [Wiktor i in. 2012] oraz liści winogron [Alibas 2014]. Z analizy wariancji wynikało, iż czas suszenia był w istotny statystycznie ($p < 0,05$) sposób, proporcjonalnie kształtowany przez temperaturę powietrza (A), moc mikrofal (B) oraz wariant obróbki wstępnej (C). Odnotowano również istotny efekt krzywoliniowy temperatury (A^2) oraz mocy mikrofal (B^2). Znaczący statystycznie wpływ ($p < 0,05$) dotyczył również interakcji mocy mikrofal oraz wariantu obróbki wstępnej (BC), co również jest widoczne na płaszczyznach odpowiedzi (rys. 1). Efekty prostoliniowe były widoczne przeważnie przy zmianie temperatury z 30 na 40°C oraz przy



Rys. 1. Płaszczyzna odpowiedzi czasu suszenia do $MR = 0,02$ w zależności od temperatury (czynniki A) i mocy mikrofal (czynniki B) otrzymana w przypadku liści pietruszki poddanych ultradźwiękom (A), obróbce parą wodną (B) i moczeniu (C)

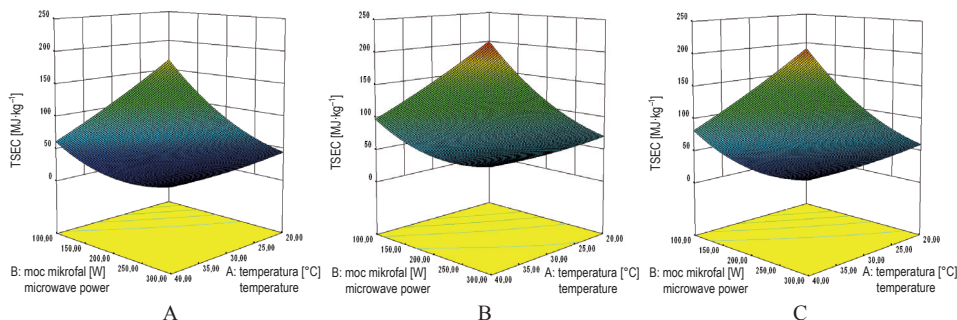
Fig. 1. Response surface of drying time to $MR = 0.02$, depending on the temperature (factor A) and microwave power (factor B), obtained in the case of parsley leaves subjected to ultrasound (A), steaming (B) and immersion (C) treatments

wzroście mocy mikrofal z 200 do 300 W, a krzywoliniowe przy zmianie parametrów suszenia z najniższych na średnie poziomy czynniki.

Wykorzystanie promieniowania mikrofalowego podczas suszenia żywności pozwala na zdecydowane skrócenie suszenia, a co za tym idzie – także i zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Na zmniejszenie energochłonności może wpłynąć także wybór odpowiednich parametrów procesu, które decydują o intensywności suszenia, jak również zastosowanie obróbki wstępnej. W przypadku wykorzystania dodatkowych zabiegów poprzedzających proces suszenia należy zatem podejść do procesu całościowo i oszacować zużycie energii w trakcie całego procesu przetwórczego (obróbki wstępnej oraz suszenia). W obecnych badaniach posłużono się zatem parametrem *TSEC*, czyli całkowitym właściwym zużyciem energii, które obejmowało zapotrzebowanie energetyczne w trakcie suszenia oraz podczas operacji wstępnych, w przeliczeniu na masę odparowanej wody. Wartość całkowitego właściwego zużycia energii mieściła się w zakresie 29,2–185,6 MJ·kg⁻¹ (US), 56,1–211,9 MJ·kg⁻¹ (PARA) oraz 40,7–212,2 MJ·kg⁻¹ (M). Torki-Harchegani i inni [2016] odnotowali całkowite właściwe zużycie energii podczas suszenia konwekcyjnego liści mięty pieprzowej na poziomie 42,7–64,7 MJ·kg⁻¹ (w zależności od temperatury powietrza), a przy suszeniu mikrofalowym w zakresie mocy mikrofal 200–800 W wyniosło ono 4,6–5,9 MJ·kg⁻¹. W obecnych badaniach zużycie energii było zatem większe, jednak należy zaznaczyć, że mięta wykorzystywana w badaniach przez Torki-Harchegani i inni [2016] charakteryzowała się dużo mniejszą początkową zawartością wody (ok. 76%). Ponadto suszenie przeprowadzone przez tych autorów trwało 4–14 min, co zapewne związane było również z obciążeniem sita oraz konstrukcją suszarki.

Immersyjna obróbka wstępna za pomocą ultradźwięków charakteryzuje się niewielką energochłonnością [Nowacka i Wędzik 2016, Śledz i in. 2017]. Zdecydowanie większa konsumpcja energii dotyczyła termicznej obróbki parą wodną, przez co wartość całkowitego właściwego zużycia energii przeważnie przekraczała zużycie energii podczas suszenia materiału moczonego, pomimo skrócenia suszenia. Innymi słowy, korzyści energetyczne związane ze skróceniem suszenia zostały zniwelowane przez konsumpcję energii podczas obróbki parą wodną. Ta zależność widoczna jest na wykresach płaszczyzn odpowiedzi (rys. 2). Projekcja płaszczyzn badanej odpowiedzi *TSEC* w całym przebiegu wykazuje większe wartości w przypadku obróbki parą wodną niż moczonego lub sonikowanego materiału. Zatem z ekonomicznego punktu widzenia, rekomendowanym zabiegiem wstępnym wydają się być ultradźwięki, które w zależności od zastosowanych warunków suszenia pozwoliły na osiągnięcie mniejszej energochłonności (wartości *TSEC*) o 0,1–33,7%. Fijałkowska i inni [2015] również zanotowali zmniejszenie energochłonności procesu suszenia buraka ćwikłowego o 11–14% w wyniku zastosowania wstępnej obróbki ultradźwiękami. Ponadto w obecnych badaniach wraz ze zwiększeniem mocy mikrofal i podwyższeniem temperatury powietrza suszącego, z racji krótszego czasu suszenia, następowało zmniejszenie zużycia energii.

Z wieloczynnikowej analizy wariancji wynika, iż na całkowite właściwe zużycie energii w istotny statystyczny sposób wpłynęły oba parametry suszenia (temperatura i moc mikrofal), a także wariant obróbki wstępnej ($p < 0,05$). Ponadto dowiedziono istotności wpływu interakcji parametrów suszenia (AB) oraz efektu krzywoliniowego mocy mikrofal (B^2). W tabeli 3 zaprezentowano równania według modelu kwadratowego dla wartości rzeczywistych, które wyznaczono oddzielnie dla każdej metody obróbki wstępnej.



Rys. 2. Płaszczyzna odpowiedzi całkowitego właściwego zużycia energii $TSEC$ do $MR = 0,02$ w zależności od temperatury (czynniki A) i mocy mikrofal (czynniki B) otrzymana w przypadku liści pietruszki poddanych ultradźwiękom (A), obróbce parą wodną (B) i moczeniu (C)

Fig. 2. Response surface of total specific energy consumption $TSEC$ to $MR = 0.02$, depending on the temperature (factor A) and microwave power (factor B), obtained in the case of parsley leaves subjected to ultrasound (A), steaming (B) and immersion (C) treatments

Tabela 3. Równania płaszczyzn odpowiedzi dla całkowitego właściwego zużycia energii ($TSEC$ – MJ·kg⁻¹)

Table 3. Equations of response surfaces for total specific energy consumption ($TSEC$ – MJ·kg⁻¹)

Obróbka Treatment	Równania – Equations
US	$TSEC = 474,20251 - 10,01373 \cdot \text{temperatura} - 1,91722 \cdot \text{moc mikrofal} + 0,024538 \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 0,038185 \cdot \text{temperatura}^2 + 2,03351 \cdot 10^{-3} \cdot \text{moc mikrofal}^2$
PARA	$TSEC = 509,00892 - 9,88206 \cdot \text{temperatura} - 1,95389 \cdot \text{moc mikrofal} + 0,024538 \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 0,038185 \cdot \text{temperatura}^2 + 2,03351 \cdot 10^{-3} \cdot \text{moc mikrofal}^2$
M	$TSEC = 505,43057 - 10,17471 \cdot \text{temperatura} - 1,95815 \cdot \text{moc mikrofal} + 0,024538 \cdot \text{temperatura} \cdot \text{moc mikrofal} + 0,038185 \cdot \text{temperatura}^2 + 2,03351 \cdot 10^{-3} \cdot \text{moc mikrofal}^2$

Optimalizacja przetwarzania liści pietruszki, zakładająca maksymalne zintensyfikowanie suszenia i zmniejszenie kosztów procesu, wskazała, że najbardziej optymalne jest poddanie liści pietruszki działaniu ultradźwięków, a następnie suszenie w temperaturze 40°C, przy mocy mikrofal 262 W (US 40°C, 262 W). Indeks celowości wyniósł w tym przypadku 0,994. Dla tych parametrów model przewidywał suszenie przez 15,3 min, a zużycie energii (wartość $TSEC$) na poziomie 29,2 MJ·kg⁻¹.

WNIOSKI

1. Energochłonność i czas suszenia były uzależnione od parametrów procesu (moc mikrofal, temperatura powietrza) oraz zastosowanej obróbki wstępnej, przy czym ulegały zmniejszeniu wraz z zastosowaniem większej mocy mikrofal i temperatury powietrza oraz obróbki za pomocą pary wodnej.

2. Ultradźwiękowa obróbka wstępna zużywała nieznaczne ilości energii, w przeciwieństwie do wysokoenergetycznej obróbki parą wodną, w przypadku której zużycie energii podczas obróbki przekraczało korzyści energetyczne związane ze skróceniem czasu suszenia.
3. Optymalnymi warunkami przetwarzania liści pietruszki, przy założeniu najmniejszych nakładów energetycznych oraz najmniejszej czasochłonności, jest zastosowanie ultradźwięków oraz suszenie w temperaturze 40°C i przy mocy mikrofal 262 W.

Podziękowania

Praca uzyskała dotację ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu Preludium, przyznanych na podstawie decyzji DEC-2012/07/N/NZ9/02076.

LITERATURA

- Alibas I., 2014. Microwave, air and combined microwave-air drying of grape leaves (*Vitis cinifera* L.) and the determination of some quality parameters. *Int. J. Food Eng.* 10, 69–88.
- Angersbach A., Heinz V., Knorr D., 2000. Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food system. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 1, 135–149.
- Azoubel P.M., Baima M.A.M., Amorim M.R., Oliveira S.S.B., 2010. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *J. Food Eng.* 97, 194–198.
- Dadan M., 2016. Badanie wpływu działania ultradźwięków oraz blanszowania parą wodną jako zabiegów wstępnych przed suszeniem mikrofalowo-konwekcyjnym wybranych ziół. Praca doktorska. SGGW, Warszawa [manuskrypt].
- Figiel A., 2009. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *J. Food Eng.* 94, 98–104.
- Fijałkowska A., Nowacka M., Wiktor A., Śledź M., Witrowa-Rajchert D., 2016. Ultrasound as a pretreatment method to improve drying kinetics and sensory properties of dried apple. *J. Food Process Eng.* 39, 256–265.
- Fijałkowska A., Nowacka M., Witrowa-Rajchert D., 2015. Wpływ fal ultradźwiękowych na przebieg suszenia i wybrane właściwości tkanki buraka ćwikłowego. *ŻNTJ* 99(2), 138–149.
- Gamboa-Santos J., Cristina Soria A., Villamiel M., Montilla A., 2013. Quality parameters in convective dehydrated carrots blanched by ultrasound and conventional treatment. *Food Chem.* 141(1), 616–624.
- González-Fésler M., Salvatori D., Gómez P., Alzamora S.M., 2008. Convective air drying of apples as affected by blanching and calcium impregnation. *J. Food Eng.* 87, 323–332.
- Guzek D., Głabska D., Wierzbicka A. 2012. Analiza wpływu parametrów procesu niskotemperaturowego blanszowania na wyróżniki tekstury ziemniaków. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 57(1), 59–62.
- Jambrak A.R., Mason T.J., Paniwnyk L., Lelas V., 2007. Accelerated drying of button mushrooms, brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *J. Food. Eng.* 81, 88–97.
- Kentish S., Ashokkumar M., 2011. The physical and chemical effect of ultrasound. W: H. Feng, G.V. Barosa-Canovas, J. Weiss (red.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. LLC, New York, 1–12.
- Mason T.J., Paniwnyk L., Chemat F., Vian M.A., 2011. *Ultrasonic food processing*. W: A. Proctor (red.). *Alternatives to Conventional Food Processing* (ed.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, 387–414.

- Nowacka M., Wędzik M., 2016. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Appl. Acoust.* 103, 163–171.
- Nowacka M., Wiktor A., Śledź M., Jurek N., Witrowa-Rajchert D., 2012. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *J. Food Eng.* 113, 427–433.
- Nowacka M., Witrowa-Rajchert D., 2011. Procesy wstępne stosowane przed suszeniem owoców i warzyw. *Przemysł Spożywczy* 65(6), 36–38.
- Rodríguez Ó., Llabrés P. J., Simal S., Femenia A., Rosselló C., 2015. Intensification of predrying treatments by means of ultrasonic assistance: effects on water mobility, PPO activity, microstructure, and drying kinetics of apple. *Food Bioprocess Tech.* 8(3), 503–515.
- Schössler K., Thomas T., Knorr D., 2012. Modification of cell structure and mass transfer in potato tissue by contact ultrasound. *Food Res. Int.* 49, 425–431.
- Soysal Y., Öztekin S., Eren Ö., 2006. Microwave drying of parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosys. Eng.* 93, 403–413.
- Śledź M., Nowak P., Witrowa-Rajchert D., 2014. Drying of parsley leaves pre-treated by ultrasound. *ZPPNR* 579, 91–99.
- Śledź M., Wiktor A., Nowacka M., Witrowa-Rajchert D., 2017. Drying kinetics, microstructure and antioxidant properties of basil treated by ultrasound. *J. Food Process Eng.* 40(1), e12271, 1–13.
- Tao Y., Wang P., Wang Y., Kadam, S.U., Han Y., Wang J., Zhou J., 2016. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrason. Sonochem.* 31, 310–318.
- Therdthai N., Zhou W., 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *J. Food Eng.* 91, 482–489.
- Torki-Harchegani M., Ghanbarian D., Pirbalouti A.G., Sadeghi M., 2016. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 58, 407–418.
- Wiktor A., Łuczywek K., Witrowa-Rajchert D., 2012. Modelowanie matematyczne kinetyki suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści bazylii. *ZPPNR* 570, 127–141.
- Witrowa-Rajchert D., 2009. Nowe trendy w suszeniu żywności. *Ekspertyza*. Warszawa.
- Witrowa-Rajchert D., Wiktor A., Śledź M., Nowacka M. 2014. Selected emerging technologies to enhance the drying process. A review. *Drying Technol.* 32(11), 1386–1396.

AN OPTIMISATION OF MICROWAVE-CONVECTIVE DRYING OF PARSLEY LEAVES SUBJECTED TO ULTRASOUND AND STEAMING TREATMENTS, CARRIED OUT ON THE BASIS OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Summary. Drying is considered as one of the most popular and most energy consuming processes in food processing. It is estimated that it consumes ca. 10–12% of total energy utilized by industry. High energy consumption links to the necessity of water phase transition during process and low thermal efficiency of dryers. Hence, industry seeks for new solutions concerning for instance pre-treatment step incorporation in order to modify intercellular structure of material and thus enhance drying kinetics. Currently, ultrasounds are the main domain of interest of scientists and engineers working on drying all over the world due to their non-thermal character. The aim of this study was to determine optimal processing conditions of parsley leaves on the basis of selection of a type of treatment, air temperature and microwave power during microwave-convective drying, assuming maximal shortening

of drying time and minimal energy consumption. The three-level factorial experiment was designed, where factors were as follows: microwave power (100, 200, 300 W), air temperature (20, 30, 40°C) and a type of treatment (ultrasound, steaming, immersion). The parsley leaves after the aforementioned treatments were dried with microwave-convective method. Drying time and total specific energy consumption (*TSEC*), which corresponded to relative water content of $MR = 0.02$, were analysed. On the basis of obtained results, it could be stated that all of the factors significantly influenced investigated variables. The shortest drying time was in the case of process performed at 300 W of microwave power and at 40°C preceded by ultrasound treatment. Despite of shortening of drying time as a result of steaming treatment, in comparison to soaked material, this treatment was characterised by high energy expenditures. Thus, the *TSEC* value was higher in the whole range in the case of steaming, compared with immersion. Based on RSM modelling procedure the optimal conditions for drying assuming minimal both time and energy consumption is application of sonication and drying performed at 40°C and 262 W of microwave power. Performed research indicated that sonication can be effectively utilized to enhance drying process of parsley leaves. Moreover, RSM approach can be considered as valuable tool for designing of drying process.

Key words: parsley leaves, ultrasound, steaming, drying, response surface methodology

