

# ANALIZA SUSZENIA MIKROFALOWO-PRÓŻNIOWEGO KORZENIA SKORZONERY. KINETYKA SUSZENIA I SKURCZ SUSZARNICZY

Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI, Mariusz SURMA, Bogdan STĘPIEŃ,  
Marta PASŁAWSKA

**Streszczenie:** Procesowi suszenia mikrofalowo-próżniowego poddano korzeń skorzonery. Celem pracy było opisanie kinetyki suszenia optymalnym modelem suszenia, określenie końcowego skurczu suszarniczego i określenie maksymalnej temperatury nagrzewania materiału w czasie całego procesu. Proces suszenia przeprowadzono przy ciśnieniu 4-6 kPa i czterech mocach mikrofal 120, 240, 360 i 480 W. Kinetykę suszenia opisano modelem Pagea dla którego współczynnik determinacji był największy, a średni błąd kwadratowy *RMSE* najmniejszy. Maksymalny objętościowy skurcz suszarniczy kształtował się na poziomie 74%. Wraz ze wzrostem mocy mikrofal malał skurcz suszarniczy i rosła temperatura suszonego materiału.

**Słowa kluczowe:** skorzonera, suszenie mikrofalowo-próżniowe, kinetyka, skurcz, temperatura.

## 1. Wstęp i cel pracy

W związku z szybkim tempem życia, stresem, ograniczonym czasem, przeciętny konsument wybiera żywność wygodną i szybką w przygotowaniu. Dużym zainteresowaniem cieszą się produkty przeznaczone do natychmiastowego spożycia jak również dania gotowe. Odpowiednie funkcjonowanie organizmu, jego kondycja, zdrowie psychiczne i fizyczne oraz samopoczucie w istotnym stopniu zależy od tego, co znajduje się w jego diecie. Dostarczenie optymalnej ilości potrzebnych składników jest indywidualną sprawą dla każdego organizmu i związane jest z jego trybem życia. Odpowiednio ułożona dieta powinna zawierać odpowiednią ilość tłuszczów, węglowodanów, białek i mikroelementów. Ważnym składnikiem codziennej diety człowieka są warzywa i owoce [9]. Są one naturalnym źródłem witamin i składników mineralnych wpływających na dobre funkcjonowanie organizmu jak również w znacznym stopniu na odporność. Największą wartością odżywczą charakteryzują się warzywa świeże. Sezonowość produkcji warzyw sprawia, że dostępność ich poza okresem zbiorów związana jest z posiadaniem odpowiedniego zaplecza przechowalniczego. Z procesem przechowywania warzyw związane są nieuniknione straty [6]. Dlatego ciągle poszukuje się metod i sposobów umożliwiających przedłużenie trwałości wytworzonych produktów. Niemal wszystkie metody konserwacji produktów pochodzenia rolniczego powodują ich przemiany, przez co otrzymujemy produkt o zmienionej jakości w stosunku do materiału wyjściowego [11]. Jedną z metod konserwacji produktów pochodzenia rolniczego jest suszenie [21]. Suszenie, co prawda przedłuża ich trwałość, lecz powoduje znaczne zmiany w porównaniu z materiałem świeżym. Konwencjonalne metody suszenia prowadzą do znacznej redukcji

cennych związków odżywczych, aromatycznych oraz prowadzą do istotnego pogorszenia cech organoleptycznych produktu końcowego [1, 17]. Wykorzystywanie suszenia konwekcyjnego na skalę przemysłową prowadzi do uzyskania produktu o niskich właściwościach odżywczych i konieczne jest niejednokrotnie dodawanie sztucznych dodatków podnoszących jakość produktu finalnego [15,16]. Dlatego poszukuje się nowych metod suszenia, które pozwolą na uzyskanie suszu o lepszych parametrach niż przy suszeniu konwencjonalnym.

W przemyśle spożywczym do suszenia produktów coraz częściej stosuje się nagrzewanie mikrofalowe [20]. Wynika to z możliwości skrócenia czasu suszenia, a także poprawy jakości suszu w stosunku do tradycyjnych metod suszenia. Dostarczona energia w postaci mikrofal dociera do całej objętości cząstek produktu, co powoduje znaczne skrócenie czasu suszenia. Relacja między temperaturą czynnika i materiałem mogą być dowolne w odróżnieniu od suszenia konwekcyjnego, podczas którego temperatura cząstek jest niższa, a co najwyżej równa temperaturze czynnika suszącego [2, 12].

Mikrofałe są to fale elektromagnetyczne o częstotliwości od  $0,3-30 \cdot 10^9$  Hz. W przemyśle spożywczym stosowane są fale o częstotliwościach 915 MHz, których długość wynosi około 33 cm i używane są najczęściej do przemysłowego rozmrażania i opiekania mięs. Drugą częstotliwością która jest wykorzystywana to 2450 MHz o długości około 12 cm, stosowana do suszenia produktów pochodzenia biologicznego oraz pasteryzacji, sterylizacji [2].

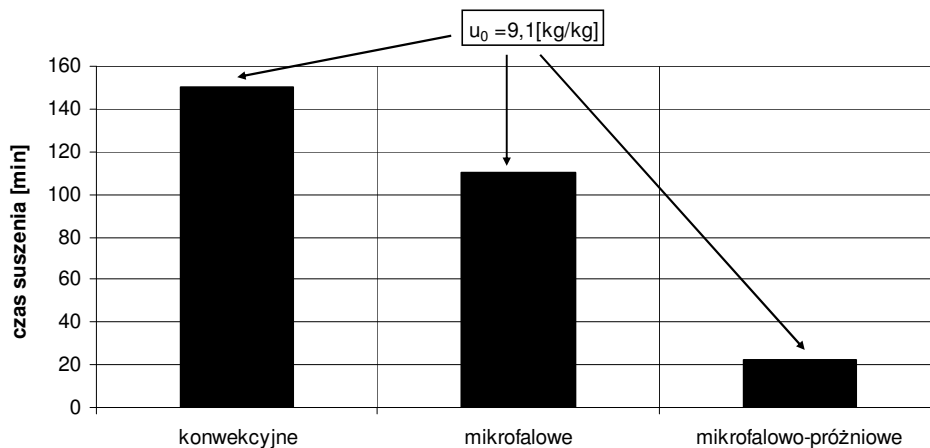
Większość materiałów, jakie poddawane są procesowi suszenia należą do grupy dielektryków. Każda cząsteczka takiego dielektryka posiada elementarne ładunki związane siłami wewnątrzcząsteczkowymi, tworząc tzw. dipole. Umieszczenie i poddanie dipoli działaniu zewnętrznego pola elektrycznego powoduje powstanie sił elektrodynamicznych doprowadzających do obrotu i ustawianiu się dipoli równolegle do kierunku zewnętrznego pola elektrycznego. W przypadku gdy mamy do czynienia z polem elektrycznym przemiennym, to wraz ze zmianą kierunku pola zachodzi oscylacja, obrót ładunków i związanych z nimi dipoli. Procesowi temu jednocześnie towarzyszy zjawisko tarcia międzycząsteczkowego, które powoduje wydzielanie energii cieplnej [20].

W czasie procesu suszenia dielektrycznego jego intensywność uzależniona jest od właściwości cieplnych materiału wilgotnego, oraz od jego właściwości dielektrycznych jak również ich zmian wraz ze zmianami wilgotności, temperatury i częstotliwości pola [3].

Wykorzystanie nagrzewania mikrofalowego w czasie suszenia konwekcyjnego znacznie skraca czas suszenia [23], umożliwia dowolne kształtowanie rozkładu temperatur wewnątrz suszonego materiału, pozwala na uniknięcie miejscowych przegrzań, zmniejszenie skurczu suszarniczego oraz pogorszenia cech sensorycznych [5]. Susz uzyskany tą metodą charakteryzuje się dobrym zachowaniem struktury i jakości powierzchni oraz dobrą rehydracją [4].

Dalszą poprawę jakości produktu finalnego można uzyskać poprzez wykorzystanie obniżonego ciśnienia w trakcie procesu suszenia. Pozytywny wpływ obniżonego ciśnienia na jakość końcową suszu jest znany. Krótki czas suszenia, ograniczony kontakt z tlenem w czasie procesu, niska temperatura materiału oraz stosunkowo mały skurcz suszarniczy powodują, że susz uzyskany tą metodą jest atrakcyjny z punktu widzenia konsumenta.

Na rysunku 1 przedstawiono porównawczo czasy wysychania marchwi przy zastosowaniu różnych metod suszenia [17].



Rys. 1. Diagram czasów suszenia kostki z marchwi różnymi sposobami  
 Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie nagrzewania mikrofalowego podczas suszenia konwekcyjnego skróciło czas suszenia o około 25%. Natomiast zastosowanie obniżonego ciśnienia z jednoczesnym nagrzewaniem mikrofalowym skróciło czas trwania procesu suszenia prawie siedmiokrotnie. Należy zaznaczyć, że we wszystkich tych przypadkach początkowe uwilgotnienie próbek było na tym samym poziomie.

Metoda skojarzona jaką jest suszenie w obniżonym ciśnieniu z jednoczesnym nagrzewaniem mikrofalowym pozwala na uzyskanie produktu o bardzo dobrych właściwościach. Obniżone ciśnienie poniżej ciśnienia atmosferycznego powoduje obniżenie temperatury wrzenia wody, wynikiem czego jest istotne zmniejszenie się niekorzystnego efektu termicznego mającego wpływ na teksturę, strukturę oraz cechy organoleptyczne produktu finalnego [14]. Dodatkowo dostarczanie energii w postaci mikrofal umożliwia nagrzewanie próbki w całej objętości w stosunkowo krótkim czasie. Możliwe jest dowolne kształtowanie temperatury materiału co związane jest z bardziej efektywnym transportem ciepła [21]. Odpowiednie sterowanie mocą mikrofal w czasie suszenia dobrane do określonego rodzaju materiału powinno znacznie ograniczyć, a nawet wyeliminować miejscowe przegrzewanie się materiału [18]. Nieodpowiednie prowadzenie procesu może doprowadzić do pogorszenia jakości produktu finalnego. W celu uzyskania suszu o prozdrowotnych właściwościach konieczny jest odpowiedni dobór parametrów suszenia, a zwłaszcza mocy mikrofal, co w przypadku zbyt wysokiej mocy może prowadzić niejednokrotnie do przypalenia materiału [20]. Metoda ta przy odpowiednim doborze i właściwym sterowaniu mocą mikrofal jak również odpowiednim ciśnieniu, umożliwia bardzo szybkie usunięcie wody z materiału przy umiarkowanej temperaturze nagrzania materiału [20]. Opracowanie odpowiedniego modelu prowadzenia procesu suszenia wpłynie również na aspekt ekonomiczny całego procesu. Przemysłowe wykorzystanie tej metody na szeroką skalę jest związane z odpowiednim rozpoznaniem zjawisk zachodzących podczas tego procesu oraz jego skutków. Zachodzi, więc konieczność optymalizacji procesu suszenia dla poszczególnych materiałów w celu uzyskania produktu

końcowego o jak najwyższej jakości. W literaturze brak jest doniesień dotyczących wykorzystania metody mikrofalowo-próżniowej do suszenia korzenia skorzonery.

Skorzonera nazywana czarnym korzeniem wywodzi się z południowej i środkowej części Europy [10]. Dawniej roślinę uważano za antidotum na jad żmij stąd też kolejna jej nazwa wężymord. Częścią jadalną jest spichrzowy korzeń, który ma długość około 30 cm. Jego skórka ma kolor ciemno brązowy, a nawet czarny, miąższ jest biały z mlecznym sokiem w smaku przypomina szparagi z lekko mącznym posmakiem. W czasie obierania korzeń wydziela kleiste mleczko zaś skórka powoduje zabarwienie na brunatny kolor. Korzeń skorzonery zawiera wiele cennych składników takich jak: potas, magnez, wapń, żelazo, fosfor, chlor, karoten, błonnik jak również witaminy: E, C i witaminy z grupy B [9]. Miąższ jest bogatym źródłem inuliny, która może zastępować cukier dla osób chorych na cukrzycę, ale też zawiera prebiotyczny błonnik stymulujący rozwój bifidobakterii

w organizmie człowieka wpływając pozytywnie na jego funkcjonowanie. Substancje zawarte w warzywie usprawniają trawienie, regulują pracę żołądka oraz pomagają w wielu dolegliwościach i chorobach układu pokarmowego [9]. Może być stosowana jako środek usuwający nadmiar wody z organizmu, zalecany przy nadwadze, otyłości oraz przy leczeniu dny moczanowej. Skorzonera jest również cennym źródłem tiaminy, która wspomaga funkcjonowanie układu nerwowego, mięśni i serca. Korzeń wężymordu może dostarczyć człowiekowi tyle samo potasu co banany, które słyną z wysokiej jego zawartości. Wysoka dawka witamin i minerałów zawarta w skorzonercie stanowić może antidotum na zmęczenie fizyczne jak i umysłowe.

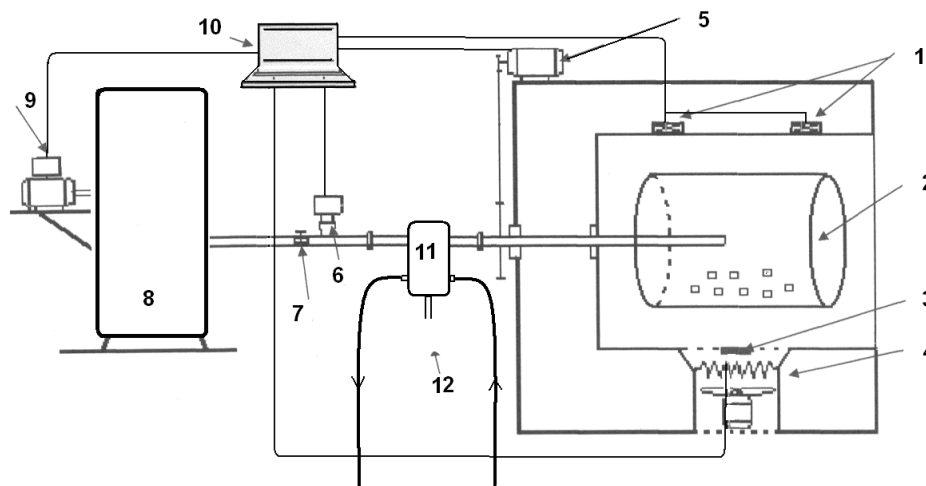
Warzywo dawno zapomniane, które swoją największą świetność miało w XIX wieku powoli wraca do łask za sprawą swojego bogatego składu [10].

Celem pracy było opisanie kinetyki suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery, określenie temperatury nagrzania materiału w czasie suszenia, oraz określenie wielkości końcowego skurczu suszarniczego w zależności od zastosowanej mocy mikrofal.

## **2. Materiał i metodyka**

Do badań użyto korzeń skorzonery. Do zrealizowania badań wykorzystano suszarkę mikrofalowo-próżniową Plazmatronika SM-200 przedstawioną na rysunku 2. Główną częścią stanowiska jest zbiornik w kształcie walca wykonany ze szkła o niskim współczynniku strat dielektrycznych (szkło sodowe). W zbiorniku tym umieszczany był materiał przeznaczony do suszenia. Zbiornik umieszczano we wnęce mikrofalowej i podłączano do układu próżniowego. Za utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w zbiorniku suszarniczym oraz instalacji odpowiada zestaw czujników wraz z pompą sterowany przy użyciu komputera.

Badania przeprowadzono dla czterech poziomów mocy mikrofal 120, 240, 360, 480 W i jednego zakresu ciśnień 4-6 kPa. Materiał świeży krojono w kostkę o krawędzi 10 mm przy użyciu wykrojnika, co zapewniało dokładność utrzymania wymiaru  $\pm 0,2$  mm. Próbkę materiału o masie ok. 60 g ważono na wadze laboratoryjnej WPE-301 i umieszczano w szklanym zbiorniku suszarniczym, podłączano układ próżniowy, a następnie rozpoczynano proces suszenia. Kolejne doświadczenia kończono po 4, 8, 12 i tak do 84 minuty w przypadku mocy 120 W. Przy zastosowaniu mocy 240,360 i 480 W proces suszenia kończono odpowiednio po 60, 40 i 32 minutach, gdy masa surowca nie zmieniała się. Doświadczenia wykonano w trzech powtórzeniach.



Rys. 2. Schemat stanowiska do suszenia mikrofalowo-próżniowego SM-200 Plazmatronika  
 1- magnetrony, 2- zbiornik suszarniczy, 3- czujnik temperatury, 4- wentylator, 5- silnik elektryczny, 6- miernik ciśnienia, 7- zawór odcinający, 8- zbiornik wyrównawczy, 9- pompa próżniowa, 10- komputer, 11- skraplacz, 12- układ chłodzący  
 Źródło: opracowanie własne

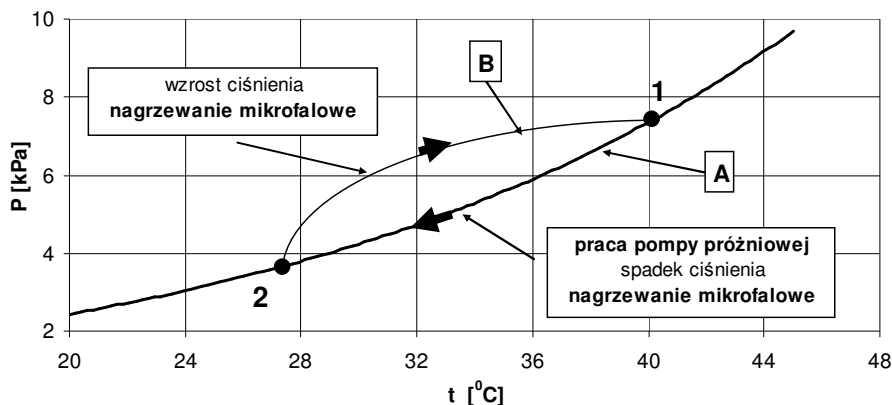
Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie proces suszenia mikrofalowo-próżniowego. Na schemacie zaznaczono dwa charakterystyczne punkty 1 i 2. Punkt pierwszy oznacza wartość ciśnienia przy którym w układzie włącza się pompa próżniowa, a w punkcie drugim następuje jej wyłączenie. Linia B przedstawia krzywą narastania ciśnienia na skutek parowania wody z próbki. Po umieszczeniu materiału w zbiorniku podłączano zbiornik do układu próżniowego i uruchamiała się pompa próżniowa, która pracowała, aż do osiągnięcia ciśnienia właściwego dla punktu 2. Nagrzewanie mikrofalami o określonej gęstości mocy powoduje, że w zbiorniku suszarniczym obserwuje się pęcherzykowanie, właściwe dla parowania z całej objętości. Po osiągnięciu punktu 2 pompa się wyłącza, a dalsze parowanie powoduje wzrost ciśnienia w zbiorniku, aż do osiągnięcia ciśnienia górnego właściwego dla punktu 1. Czas trwania spadku ciśnienia oraz czas jego narastania są charakterystyczne dla zastosowanych parametrów procesowych i właściwości materiału suszonego.

Pomiar i rejestracja temperatury nagrzania próbek materiału w czasie suszenia wykonywano przy użyciu kamery termowizyjnej FLIR I5 wraz z modułem archiwizacji danych.

Oznaczenie zawartości suchej masy dla wszystkich doświadczeń przeprowadzono metodą wagosuszarkową zgodnie z Polską Normą PN-91/R-87019.

W celu przedstawienia kinetyki procesu suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery obliczono względną zawartość wody korzystając z poniższego wzoru:

$$MR = \frac{u_{\tau} - u_r}{u_0 - u_r} \quad (1)$$



Rys. 3. Schemat procesu suszenia mikrofalowo-próżniowego  
 Źródło: Opracowanie własne

gdzie:

- $MR$  – względna zawartość wody (-),
- $u_o$  – początkowa zawartość wody ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.),
- $u_\tau$  – zawartość wody po czasie  $\tau$  ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.),
- $u_r$  – równowagowa zawartość wody ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.).

Do matematycznego opisu krzywych suszenia korzenia skorzonery wybrano modele najczęściej wykorzystywane w literaturze przedstawione w tabeli 1. Analizę regresji krzywych suszenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu TableCurve 3D oraz arkusza Microsoft Excel 2007.

Tab. 1. Modele matematyczne użyte do opisu przebiegu kinetyki procesu suszenia korzenia skorzonery

Numer	Nazwa modelu	Równanie
1	Newton	$MR = \exp(-k\tau)$
2	Page	$MR = \exp(-k\tau^a)$
3	Henderson Pabis	$MR = a \exp(-k\tau)$
4	Modif. Henderson i Pabis	$MR = a \exp(-k\tau) + b \exp(-g\tau) + c \exp(-h\tau)$
5	Two-Term Asymptotic	$MR = a \exp(b\tau) + c \exp(d\tau)$
6	Two-Term Logarithmic	$MR = a \exp(-k\tau) + b$
7	Wang i Singla	$MR = 1 + a\tau + b\tau^2$
8	Midilli i in.	$MR = a \exp(-k\tau^n) + b\tau$

Źródło: opracowanie własne

W celu wyboru najlepszego modelu matematycznego opisującego kinetykę suszenia wyznaczono średni błąd kwadratowy *RMSE* [19].

Określono również wartość końcowego skurczu objętościowego. Próbkę o masie ok. 60 g umieszczano w cylindrze miarowym napełnionym wodą i odczytywano objętość, następnie po ich wyjęciu i osuszeniu na bibule filtracyjnej materiał poddawano procesowi suszenia. Po wysuszeniu materiał ważono i umieszczano w tym samym cylindrze miarowym wypełnionym toluenem i odczytywano objętość. Każde doświadczenie wykonano w trzech powtórzeniach. Skurcz wywołany suszeniem obliczano z zależności [8].

$$S = \left( 1 - \frac{V_k}{V_0} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$V_k$  – objętość kocowa ( $m^3$ ),  
 $V_0$  – objętość początkowa ( $m^3$ ).

W celu określenia wpływu zastosowanych mocy mikrofal na końcowy skurcz suszarniczy, analizę wariancji wykorzystując arkusz kalkulacyjny MS Excel 2007, przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

### 3. Wyniki i dyskusja

Proces suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery do tej samej wartości względnej zawartości wody, wynosił w zależności od 32 do 84 minut w zależności od zastosowanej mocy mikrofal. Najdłuższy czas zanotowano w przypadku początkowej najmniejszej mocy mikrofal (120W). Zwiększenie mocy mikrofal do wartości 240W spowodowało skrócenie czasu suszenia o 29%. W przypadku zastosowania mocy 360W czas ten skrócił się o 53%. Zwiększenie mocy początkowej czterokrotnie spowodowało skrócenie czasu suszenia o 62%. Jednoczynnikowa analiza wariancji wykazała istotny wpływ mocy mikrofal na czas suszenia.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy regresji dopasowania danych eksperymentalnych przeprowadzonej odpowiednio dla każdej zastosowanej mocy mikrofal. Na podstawie analizy współczynników determinacji dla wszystkich zastosowanych modeli mieszczących się w przedziale od 0,5214 do 0,9997 można stwierdzić, że większość z zastosowanych modeli dobrze opisywała dane doświadczalne. Najmniejszy współczynnik  $R^2$  jest w przypadku modelu nr 4. Również w przypadku modelu 4 Zmodyfikowany Henderson i Pabis wartość *RMSE* była największa na poziomie 0,3166. Model ten najgorzej opisywał dane uzyskane z doświadczeń suszenia korzenia skorzonery. Najwyższą wartością współczynnika determinacji ( $R^2$ ) i jednocześnie najmniejszym średnim błędem kwadratowym *RMSE* kształtującym się na poziomie 0,0046 charakteryzował się model nr 2 Pagea. Model ten bardzo dobrze opisywał kinetykę suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery przy zastosowaniu wszystkich czterech mocy mikrofal. Badania wielu autorów potwierdzają dobre dopasowanie modelu Pagea do danych doświadczalnych [4, 24].

Tab. 3. Zestawienie wartości współczynnika determinacji i parametru RMSE dla ciśnienia 4-6 kPa i wszystkich modeli

Nr	Moc mikrofal [W]	R <sup>2</sup>	RMSE
1	120	0,9985	0,01363
	240	0,9991	0,00839
	360	0,9992	0,00848
	480	0,9995	0,00721
2	120	0,9992	0,00724
	240	0,9996	0,00586
	360	0,9998	0,00467
	480	0,9997	0,00591
3	120	0,9984	0,01363
	240	0,9991	0,00839
	360	0,9992	0,00848
	480	0,9995	0,00722
4	120	0,5674	0,31660
	240	0,8566	0,11439
	360	0,5214	0,24152
	480	0,9849	0,07262
5	120	0,9992	0,00763
	240	0,9992	0,00798
	360	0,9994	0,00799
	480	0,9995	0,00720
6	120	0,9984	0,01105
	240	0,9992	0,00757
	360	0,9993	0,00763
	480	0,9996	0,00717
7	120	0,9801	0,04898
	240	0,9667	0,06511
	360	0,9668	0,06601
	480	0,9586	0,07491
8	120	0,9990	0,00765
	240	0,9992	0,00804
	360	0,9993	0,00821
	480	0,9845	0,82311

Źródło: opracowanie własne

W tabeli 4 przedstawiono wartości współczynników w modelu nr 2 dla ciśnienia 4-6 kPa, otrzymanych na podstawie analizy regresji.

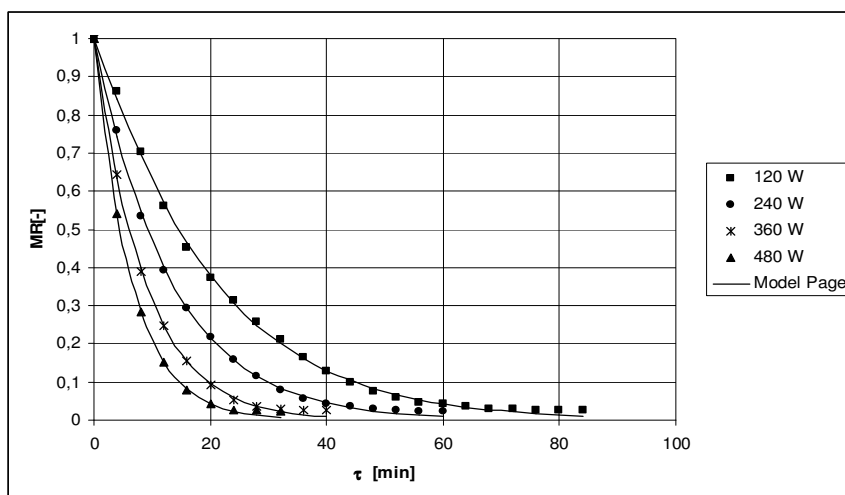
Na rysunku 4 przedstawiono punkty kinetyki suszenia korzenia skorzonery uzyskane na drodze przeprowadzonego eksperymentu wraz z modelem numer 2 Pagea dla wszystkich zastosowanych w doświadczeniu mocy mikrofal. Analiza krzywych pozwoliła potwierdzić dobre dopasowanie wybranego modelu do punktów doświadczalnych. Zwiększenie mocy mikrofal ma wpływ na kinetykę suszenia korzenia skorzonery.



Tab. 4. Wartości współczynników w modelu Pagea opisującego przebieg suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery dla ciśnienia 4-6 kPa

Ciśnienie [kPa]	Moc mikrofal [W]	$k$	$a$
4-6	120	0,03878	1,07408
	240	0,07277	1,01791
	360	0,11113	1,01721
	480	0,15361	1,00690

Źródło: opracowanie własne

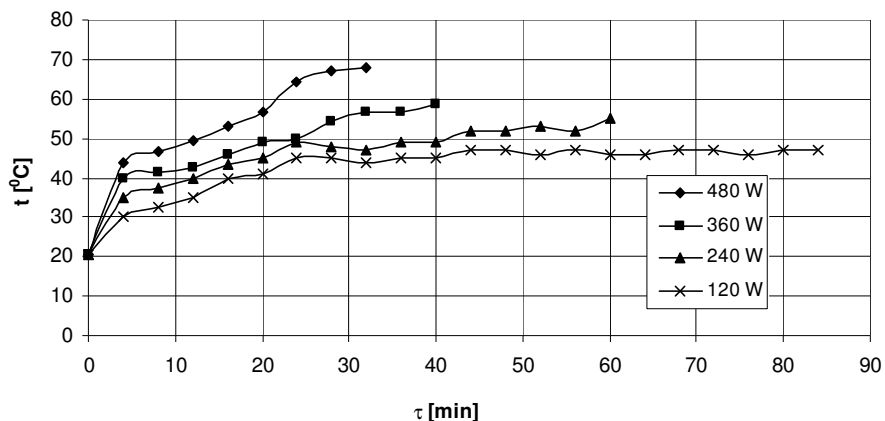


Rys. 4. Wartości doświadczalne i krzywe suszenia mikrofalowo-próżniowego uzyskane na podstawie modelu Pagea dla ciśnienia 4-6 kPa i wszystkich mocy mikrofal

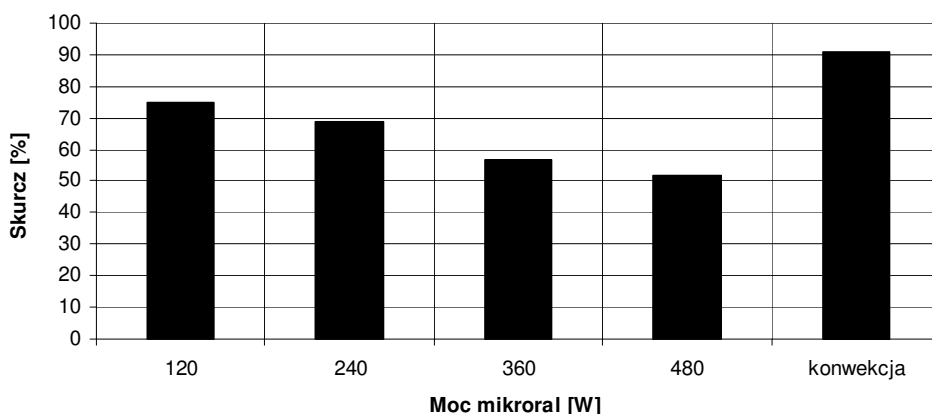
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 5 przedstawiono temperaturę nagrzania materiału w czasie trwania procesu suszenia mikrofalowo-próżniowego w zależności od zastosowanej mocy mikrofal. Gwałtowny wzrost temperatury materiału zachodzi w pierwszych 4 minutach trwania procesu suszenia. W przypadku zastosowania najmniejszej mocy mikrofal 120 W, maksymalna temperatura, do jakiej nagrzał się materiał wynosiła 47 °C. Zastosowanie mocy 240, 360 i 480 W spowodował wzrost maksymalnej temperatury nagrzania materiału odpowiednio do 55, 59 i 68 °C. We wszystkich czterech przypadkach zaobserwowano wyraźną stabilizację temperatury w końcowym okresie suszenia, co związane jest z brakiem wody w materiale. Przeprowadzona analiza wariancji wykazała istotny wpływ mocy mikrofal na maksymalną temperaturę materiału.

W celu obniżenia temperatury nagrzania materiału w trakcie procesu suszenia mikrofalowo-próżniowego należy opracować optymalny model sterowania mocą mikrofal polegający na stopniowej redukcji mocy mikrofal. Zmniejszanie mocy powinno być powiązane z chwilową wilgotnością materiału. Może to doprowadzić do uzyskania produktu o bardzo dobrych właściwościach prozdrowotnych przy zachowaniu stosunkowo krótkiego czasu suszenia.



Rys. 5. Zmiany temperatury nagrzania materiału w czasie suszenia mikrofalowo-próżniowego dla ciśnienia 4-6 kPa i mocy 120, 240, 360 i 480 W  
Źródło: opracowanie własne



Rys.6. Skurcz suszarniczy mikrofalowo-próżniowy na tle skurczu konwekcyjnego

Wykorzystanie metody mikrofalowo-próżniowego do suszenia produktów pochodzenia biologicznego prowadzi do znacznego ograniczenia skurczu suszarniczego w stosunku do suszenia tradycyjnego (suszenie konwekcyjne), w którym skurcz korzenia skorzonery jest na poziomie 91%. W przypadku zastosowania najmniejszej mocy mikrofal końcowy objętościowy skurcz suszarniczy kształtował się na poziomie 74%. Zwiększenie mocy mikrofal do 240 W spowodowało ograniczenie skurczu suszarniczego do 69 %. W przypadku zastosowania dwóch największych mocy mikrofal skurcz suszarniczy kształtował się odpowiednio na poziomie 57 i 52%. Analiza wariancji wykazała istotny wpływ zastosowanej mocy mikrofal na końcowy skurcz suszarniczy.

#### 4. Wnioski

1. Przebieg suszenia mikrofalowo-próżniowego korzenia skorzonery najlepiej opisywał model Pagea.

2. Wraz ze wzrostem mocy mikrofal (w badanym zakresie) skróceniu ulegał czas suszenia maksymalnie o 62 % i malał objętościowy skurcz suszarniczy do wartości 52 %.
3. Zwiększenie mocy mikrofal (w badanym zakresie) spowodowało wzrost temperatury nagrzania materiału od 47 do 68°C.

## Literatura

1. Alias I.: Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering* 96 (4), s. 495-502, 2007.
2. Datta A. i Peyre F., Electromagnetic modeling microwave heating patterns: focussing and exponential decay as affected by food dielectric properties. *Engineering & Food*. Sheffield Academic Press 1997. Vol. 1 pp 45-48, 1997.
3. Engelder, David S.; Buffler Charles R. Measuring Dielectric Properties of Food Products at Microwave Frequencies. *Microwave World*, vol. 12, n.2, s.6-15, 1991.
4. Figiel A.: Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *Journal of Food Engineering*, Volume 94, Issue I, 2009, s. 98-104.
5. Giese, J., Advances in microwave food processing, *Food Technology*, 46,(9), pp. 118-123, 1992.
6. Jastrzębski W., *Technologia chłodnicza żywności*, WSiP Warszawa, 1991.
7. Konieczna M., Szarycz M., Kramkowski R, Makrouszkodzenia nasion bobiku suszonych konwekcyjnie i mikrofalowo-konwekcyjnie, *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych* z 454, 545-552., 1998.
8. Krzykowski A., Rydziak L., , Skurcz objętościowy i zmiany gęstości marchwi w procesie konwekcyjnego suszenia, *Inżynieria Rolnicza* 2, 147, 2001.
9. Kunachowicz H., Nadolna I., Przygoda B., Iwanow K.: Tabele wartości odżywczej produktów spożywczych. *IŻŻ* 85, Warszawa ISBN 83-200-3112-5, 1998.
10. Lańska D., *Leksykon przyrody „Jadalne rośliny dziko rosnące”* Wydawnictwo Delta Warszawa, 1992.
11. Łoś-Kuczera M., *Składniki i wartości odżywcze produktów spożywczych*. PZWŁ, Warszawa, 1991.
12. Pabis S., *Suszenie płodów rolnych*. PWRiL, Warszawa, 1965.
13. Pijanowski E., Dłużewski M., Jarycz A., „Ogólna technologia żywności”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1997.
14. Sham P. W. Y., Scaman C. H., Durance T. D.: Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety. *Journal of Food Science*, 66 (9), 1341-1347, 2001.
15. Skorupska E.: Badanie procesu suszenia konwekcyjnego pietruszki korzeniowej. *Inżynieria Rolnicza* Nr. 9 (69), s. 313-320, 2005.
16. Sokhansanj S., Yayas D., Drying of Foodstuff, In „Handbook of Industrial Drying” von.1, A.S. Mujumadar (ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 589-625, 1995.
17. Stępień B.: Impact of the drying method on the process of carrot cutting. *Acta Agrophysica* 9(1), s. 255-267, 2007.
18. Surma M., Jałoszyński K., Paślawska M., Peroń S.: Wpływ temperatury czynnika suszącego na kinetykę suszenia, zawartość polifenoli i aktywność przeciwutleniającą suszonej fontannowo papryki czerwonej. *Inżynieria Rolnicza* Nr. 4 (147), s. 325-333, 2013.

19. Sutar P.P., Prasad G.: *Drying Techn.* 25, Nr. 10, 2007.
20. Szarycz M., Kramkowski R., Kamiński E.: Zastosowanie mikrofal do suszenia produktów spożywczych. Część II. Konsekwencje sterowania mocą mikrofal. *Problemy Inżynierii Rolniczej* nr 2/2002, Warszawa, s. 55-63, 2002.
21. Szarycz M., Fidos M., Jałoszyński K.: Wpływ zakresu ciśnień podczas suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem selera korzeniowego na kinetykę procesu i pracę cięcia rehydrowanego materiału. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 4 (79), s. 239-246, 2006.
22. Szarycz M., Kramkowski R., Kamiński E., Możliwości zastosowania mikrofal w suszarnictwie żywności. *Maszyny dla Przetwórstwa Płodów Rolnych* nr 1 (14 )"0 l.s. 13-19. Pleszew, 2001.
23. Wiktor A., Łuczywek K., Witrowa-Rajchert D.: Modelowanie matematyczne kinetyki suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści bazylii. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* z 570, s. 127-141, 2012.

Dr inż. Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI

Dr inż. Mariusz SURMA

Dr hab. inż. Bogdan STĘPIEŃ

Dr inż. Marta PASŁAWSKA

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Instytut Inżynierii Rolniczej

51-630 Wrocław, ul. Chełmińskiego 37/41

tel/fax.:(0-71)3205700

e-mail: [klaudiusz.jaloszynski@upwr.edu.pl](mailto:klaudiusz.jaloszynski@upwr.edu.pl)

[mariusz.surma@upwr.edu.pl](mailto:mariusz.surma@upwr.edu.pl)

[bogdan.stepien@upwr.edu.pl](mailto:bogdan.stepien@upwr.edu.pl)

[marta.paslawska@upwr.edu.pl](mailto:marta.paslawska@upwr.edu.pl)