

**Modyfikacja cech
mechanicznych i reologicznych
wybranych warzyw pod wpływem
różnych metod suszenia**

Bogdan Stępień

**Modyfikacja cech
mechanicznych i reologicznych
wybranych warzyw pod wpływem
różnych metod suszenia**



Opiniodawcy:

prof. dr hab. Józef Horabik
prof. dr hab. Dorota Witrowa-Rajchert

Redaktor merytoryczny

prof. dr hab. Zygmunt Owskiak

Opracowanie redakcyjne

dr Ewa Jaworska

Korekta

mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Łamanie

Teresa Alicja Chmura

Projekt okładki

Halina Sebzda

Monografie LXXIX

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2009

ISBN 978-83-60574-75-1

ISSN 1898-1151

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO WE WROCŁAWIU

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki

ul. Sopotcka 23, 50–344 Wrocław, tel./fax 071 328–12–77

e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 +16 egz. Ark. wyd. 9,9. Ark. druk. 10,0
Druk i oprawa: EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Spółka Jawna
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek

SPIS TREŚCI

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA.....	7
INDEKSY	7
1. WPROWADZENIE I PRZEGLĄD LITERATURY.....	9
1.1. Cechy mechaniczne i reologiczne surowców rolniczych	12
1.2. Metody suszenia i ich wpływ na jakość suszu.....	14
1.3. Warunki suszenia	22
1.4. Wybrane czynniki wpływające na właściwości suszy warzywnych	23
1.4.1. Struktura komórkowa suszy warzywnych.....	24
1.4.2. Wpływ blanszowania na jakość suszy	26
1.4.3. Wpływ odwadniania osmotycznego na jakość suszy	30
1.5. Podsumowanie przeglądu literatury.....	33
2. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU BADAWCZEGO I HIPOTEZY ROBOCZE	35
3. CEL I ZAKRES BADAŃ.....	36
4. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH	38
4.1. Materiał badawczy	38
4.2. Zabiegi wstępne	39
4.2.1. Blanszowanie.....	39
4.2.2. Odwadnianie osmotyczne.....	40
4.3. Suszenie warzyw.....	40
4.3.1. Metoda konwekcyjna.....	41
4.3.2. Metoda sublimacyjna.....	43
4.3.3. Metoda mikrofalowa w warunkach obniżonego ciśnienia	44
4.4. Badania wytrzymałościowe	45
4.4.1. Testy ściskania.....	45
4.4.2. Testy przecinania	47
4.4.3. Obliczanie wartości pracy ściskania i pracy przecinania	47
4.5. Badania relaksacji naprężeń.....	48
4.6. Badania rehydracji suszy	50
4.7. Badania struktury wewnętrznej	51
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA.....	54
5.1. Analiza statystyczna wyników badań	56
5.2. Praca ściskania suszy warzywnych.....	62
5.3. Praca przecinania suszy warzywnych.....	71
5.4. Rehydracja suszy	79

5.5. Analiza struktury wewnętrznej	85
5.6. Praca ściskania suszy warzywnych po ponownym uwodnieniu.....	94
5.7. Praca przecinania suszy warzywnych po ponownym uwodnieniu.....	102
5.8. Relaksacja naprężeń.....	110
6. DYSKUSJA NAD WYNIKAMI I PODSUMOWANIE	116
7. WNIOSKI.....	123
8. PIŚMIENNICTWO.....	125
ZAŁĄCZNIK	141

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

P_c	– praca ściskania	mJ lub mJ·g ⁻¹
P_p	– praca przecinania	mJ·cm ⁻²
h_0	– wysokość początkowa próbki	mm
Δh	– odkształcenie bezwzględne próbki	
F_0	– początkowa siła relaksacji	N
$F(\tau)$	– siła relaksacji po czasie τ	N
A_i, B_i	– stałe równania wykładniczego dla modelu Maxwella	–
$Y(\tau)$	– współczynnik zaniku siły w trakcie relaksacji naprężeń	–
a, b	– stałe procesu relaksacji naprężeń	–
m_0	– masa początkowa próbki rehydrowanej	g
m_τ	– masa próbki po czasie τ rehydracji	g
m_{s0}	– masa sucha próbki przed rehydracją	g
$m_{s\tau}$	– masa sucha próbki po czasie τ rehydracji	g
g	– grubość ścian komórkowych	μm
w	– wydłużenie komórki	–
k	– kolistość komórki	–
P	– pole powierzchni komórki	m ²
O	– obwód komórki	m
a_w	– aktywność wody	–
u	– zawartość wody	kgH ₂ O·kgss ⁻¹

INDEKSY

SK	– suszenie konwekcyjne
SS	– suszenie sublimacyjne
SMP	– suszenie mikrofalowe w warunkach obniżonego ciśnienia
BO	– brak obróbki wstępnej
BL	– blanszowanie
OS	– odwadnianie osmotyczne

1. WPROWADZENIE I PRZEGLĄD LITERATURY

Woda jest powszechnym składnikiem żywności, stanowiącym od kilku do ponad 98% jej masy. Trwałość żywności związana jest z tzw. aktywnością wody, definiowaną jako stosunek ciśnienia pary wodnej nad żywnością (p) do ciśnienia pary wodnej nad czystą wodą (p_n), w tej samej temperaturze:

$$a_w = \left(\frac{p}{p_n}\right)_{P,T} \quad (1.1)$$

Badania wykazały [Lewicki 1999], że rozwój większości pleśni jest zahamowany przy $a_w < 0,7$, drożdży przy $a_w < 0,8$, natomiast większości bakterii przy $a_w < 0,9$.

Suszenie jest jednym z najstarszych i najpowszechniej stosowanych zabiegów utrwalających żywność i pasze. Polega na usuwaniu wody z produktu w celu zmniejszenia jej aktywności chemicznej, co umożliwia ograniczenie rozwoju drobnoustrojów oraz przemian enzymatycznych i nieenzymatycznych. Suszenie produktów pochodzenia roślinnego może zakończyć się sukcesem, jeśli zostaną odpowiednio skorelowane trzy czynniki: ciepło, które po dostarczeniu do materiału powoduje usuwanie wody z komórek, powietrze zdolne do wchłaniania wilgoci oraz cyrkulacja powietrza odpowiadająca za transport wilgoci z otoczenia suszonego materiału. Istotą suszenia produktów żywnościowych jest usuwanie wilgoci tak szybko, jak to możliwe, w temperaturze, która nie zmieni istotnie właściwości produktu. Jeśli w początkowej fazie procesu temperatura jest zbyt niska, mikroorganizmy nie tylko mogą przetrwać, ale mogą ulec rozmnożeniu, nim uzyska się zakładany stopień wysuszenia materiału. Zbyt wysoka temperatura przy niskiej wilgotności materiału powoduje twardnienie zewnętrznych warstw suszu. Utrudnia to znacznie usuwanie resztek wilgoci z suszonego materiału, a więc uzyskanie suszu o odpowiednio niskiej wilgotności.

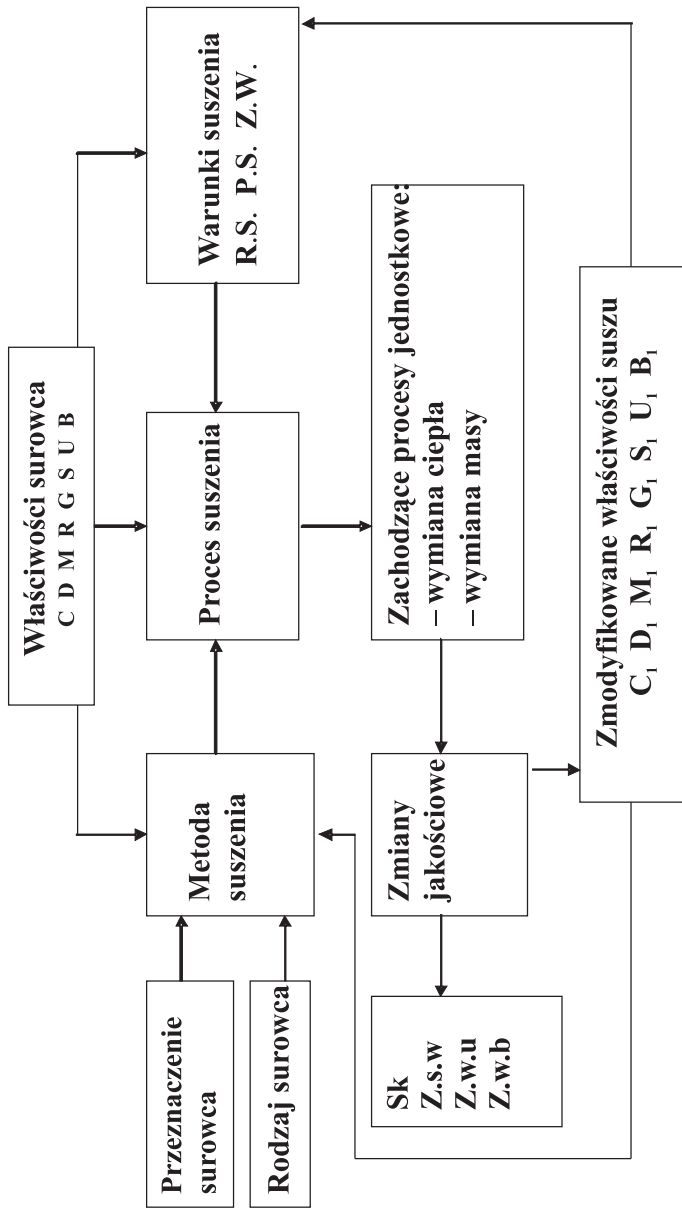
Suszenie pozwala otrzymać produkt o właściwościach, których nie można uzyskać stosując inne metody utrwalania materiałów o strukturze komórkowej. Szczególnie znaczenie ma duża stabilność produktu w temperaturze pokojowej. Obecnie obserwujemy duże zainteresowanie przemysłu farmaceutycznego i biotechnologicznego możliwościami utrwalania biomolekuł dla poprawienia przyswajalności produktu przez organizm ludzki [Aguilera i in. 2003]. Nowe techniki suszarnicze pozwalają uzyskać produkt nadający się do wykorzystania w szczególnych dziedzinach aktywności człowieka, takich jak:

wojsko, medycyna, żeglarstwo, alpinizm itp. Ocena przebiegu procesów pozyskiwania produktów występujących w formie suszy powinna być dokonywana w oparciu o cztery kryteria: szybkość przebiegu procesu, wydajność energetyczną, koszty operacji i jakość produktu [Gunasekaran 1999].

Usuwanie wody ze świeżego produktu spożywczego (zboża, owoce, warzywa i inne) wiąże się z konsekwencjami tak pozytywnymi, jak i negatywnymi. Do pozytywnych należą: możliwość długotrwałego przechowywania oraz zmniejszenie ciężaru i objętości, co ma wpływ na transport i magazynowanie. Ponadto, poprawie ulegają niektóre właściwości technologiczne determinujące dalszą obróbkę (np. mielenie zbóż). Do negatywnych należą zmiany: struktury wewnętrznej decydujące o teksturze i jędrności, właściwości sensorycznych (smak, barwa, zapach, wygląd itp.), składu chemicznego (zawartość witamin i substancji odżywczych) i inne, co schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

Początkowe właściwości surowca: cieplne (C), dyfuzyjne (D), mechaniczne (M), reologiczne (R), geometryczne (G), użytkowe (U), biochemiczne (B) i budowa struktury wewnętrznej (S) ulegają modyfikacji i w efekcie końcowym uzyskują wartości oznaczone na rysunku 1 indeksami 1. O wielkości tych zmian decydują z jednej strony rodzaj i konstrukcja suszarki (R.S.), parametry suszenia (P.S.) (temperatura czynnika suszącego, temperatura nagrzania materiału, prędkość przepływu czynnika, moc magnetronów w przypadku nagrzewania mikrofalowego, wielkość ciśnienia przy liofilizacji itp.), zabiegi wstępne (blanszowanie, odwadnianie osmotyczne), z drugiej zaś metoda doprowadzania ciepła (konwekcyjna, kondukcyjna, mikrofalowa itp.). O doborze metody suszenia decyduje z jednej strony rodzaj surowca (stopień rozdrobnienia, konsystencja itp.), z drugiej zaś jego przeznaczenie (materiał nasienny, rodzaj dalszej przeróbki itp.).

Przyczynami zmian właściwości surowca i suszu są podstawowe procesy jednostkowe zachodzące podczas suszenia: wewnętrzny i zewnętrzny transport ciepła oraz wewnętrzny i zewnętrzny transport masy (wilgoci). Powodują one zmiany struktury wewnętrznej (wielkość i układ komórek), zmiany właściwości biochemicznych (zawartość witamin, straty składników pokarmowych itp.), skurcz liniowy i objętościowy, co w konsekwencji może prowadzić do pogorszenia właściwości użytkowych produktu.



Właściwości:

- C – cieplne
- D – dyfuzyjne
- M – mechaniczne
- R – reologiczne
- G – geometryczne
- S – strukturalne
- U – użytkowe
- B – biochemiczne
- R.S. – rodzaj suszarki
- P.S. – parametry suszenia
- Z.W. – zabiegi wstępne
- Sk. – skurcz
- Z.s.w – zmiany struktury wewnętrznej
- Z.w.u – zmiany właściwości użytkowych
- Z.w.b – zmiany właściwości biologicznych

Rys. 1. Schemat oddziaływań decydujących o jakości suszonych produktów
 Fig. 1. Interaction scheme that determining the quality of dried products

1.1. Cechy mechaniczne i reologiczne surowców rolniczych

Materiały biologiczne stwarzają poważne problemy zarówno w fazie rozważań teoretycznych, jak i prac doświadczalnych. Właściwości mechaniczne materiałów roślinnych zmieniają się nie tylko w obrębie gatunku, ale również w obrębie odmiany. Ponadto zależą od środowiska glebowego, technologii uprawy, a także od czasu i warunków przechowywania oraz miejsca pobrania próbek z rośliny. Dodatkową trudność stwarza warstwowa budowa wielu korzeni warzywnych [Szot i Gołacki 1987, Wang 2003, Abbott i Lu 1996, Stopa 2002, Bohdziewicz 2001a, 2001b].

Badania właściwości mechanicznych warzyw są często traktowane jako uzupełnienie badań biochemicznych pozwalających ocenić jakość poszczególnych odmian oraz ich trwałość przechowalniczą. Najczęściej wyznaczane są w oparciu o testy zginania i przecinania całych korzeni oraz ściskania ich wycinków [Szot i in. 1987, Szot i Gołacki 1987]. Właściwości mechaniczne surowców rolniczych zależą od ich wilgotności oraz od fazy rozwoju fizjologicznego. Stan ścian komórkowych jest podstawowym elementem w strukturze tkankowej rośliny decydującym o kształtowaniu się cech mechanicznych. W trakcie przechowywania surowców związki polimerowe ulegają częściowej dehydratacji, co zwiększa ich spoistość i wpływa na wytrzymałość i sprężystość tkanek. Oprócz wysychania, niemal w całym okresie przechowywania, występuje proces oddychania roślin, co powoduje znaczne zmiany wartości modułów sprężystości oraz naprężeń krytycznych. Najwięcej informacji o badanym obiekcie uzyskuje się poprzez próby ściskania, a moduł sprężystości, obliczony ze stycznej do początkowego odcinka krzywej ściskania, może być wyznacznikiem świeżości materiału. Próby ściskania wykorzystuje się również do wyznaczania obrazów izochrom, co na przykładzie korzenia marchwi zaprezentowali Stopa i inni [2006]. Kształt rdzenia w istotny sposób wpływa na rozmieszczenie izochrom obserwowanych na rejestrowanych obrazach. Największa koncentracja naprężeń w warstwie kory występuje dla rdzenia o kształcie czworokąta.

Spośród dostępnych wyników badań surowców roślin nie uprawianych w Polsce na uwagę zasługują analizy zmian cech mechanicznych ryżu i orzechów [Olaniyan i Oje 2002, Kamst i in. 2002]. W przypadku orzechów charakterystykę mechaniczną oparto na testach ściskania, które pozwoliły wyznaczyć wartości sił niszczących, odkształceń i zwięzłości mierzonych w punkcie pęknięcia struktury. Dla ryżu obserwowano zmiany wartości modułu sprężystości oraz wytrzymałości na ściskanie w funkcji prędkości zadawania obciążenia. Spadek prędkości odkształcania w trakcie testów ściskania ogranicza intensywność oddziaływania elementów lepkich w strukturze badanego materiału, przez co wartości modułów sprężystości oraz wytrzymałość na ściskanie się obniżają.

Nieliczne doniesienia literaturowe dotyczą cech mechanicznych materiałów roślinnych, ale po przetworzeniu. Mechaniczne właściwości materiałów biologicznych ulegają istotnym zmianom w wyniku zamrażania tkanek. Badania sił niszczących strukturę tkankową ziemniaka oraz energii zniszczenia i współczynnika Poissona wykazały, że wraz z obniżaniem temperatury zamrażania materiał staje się bardziej kruchy, powodując spadek wartości sił niszczących. Po zakończeniu fazy formowania się kryształków

rodu relaksacja naprężeń przebiega wolniej w stosunku do relaksacji naprężeń materiału będącego w początkowej fazie zamrażania [Shi i in. 1998]. W oparciu o testy ściskania obliczono również wartości współczynników tarcia wewnętrznego oraz opisano zmiany spójności mączki kukurydzianej i sojowej. Badania wykazały, że w warunkach krótkotrwałego ściskania, przy niskich poziomach naprężeń, mączka kukurydziana i sojowa powinny być traktowane jak materiał zdolny do ruchu swobodnego [Molenda i in. 2002].

Oddziaływanie sił zewnętrznych na materiały biologiczne powoduje skutki na tyle skomplikowane, że do pełnej charakterystyki mechanicznej potrzebne jest uwzględnienie czasu trwania deformacji. Jest to typowe podejście reologiczne do problemu, gdzie przyjmuje się, że ciała rzeczywiste płyną pod obciążeniem. Materiały roślinne charakteryzujące się dużą zawartością wody wykazują pełzanie i relaksację naprężeń. Testy pełzania i relaksacji naprężeń wykorzystuje się do wyznaczania charakterystyk lepko-sprężystych, które są ważnym źródłem informacji o odporności mechanicznej materiałów, a także o jakości konsumpcyjnej i przechowalniczej. Cechy mechaniczne służą również do określania stopnia dojrzałości surowców oraz przydatności do sortowania.

Zagadnieniami związanymi z cechami reologicznymi surowców rolniczych zajmowało się wielu badaczy. Obiektami badań były popularne warzywa i owoce, takie jak: marchew [Gołacki 1996, 2001, Gołacki i Obroślak 1998, Gołacki i Stropek 2001], buraki [Bentini i in. 2005], ziemniaki [Gołacki i in. 2005, Kolowca i in. 2006], jabłka [Kolowca 2005], a także soja i pomidory [Henry i in. 2000], ziarna zbóż [Kolowca 2006a, 2006b] oraz inne materiały, takie jak włókna kokosowe czy skóra zwierzęca [Viswanathan i Gothandapani 1999, Henry i in. 2000].

Modele reologiczne, służące do opisu relaksacji naprężeń lub pełzania materiałów pochodzenia roślinnego, są najczęściej przedstawiane w postaci konstytutywnych równań różniczkowych lub całkowych. Modele liniowe, jako mechaniczne analogi zawierające układ sprężyn i tłumików wiskotycznych, są najbardziej popularnymi modelami stosowanymi do opisu reologii materiałów biologicznych [Gołacki i Stropek 2001]. Zaletą modeli liniowych jest łatwość tworzenia równań konstytutywnych, natomiast ich wada polega na możliwości występowania znaczących różnic pomiędzy rzeczywistym przebiegiem procesu a prognozą wyników z modelu, co jest spowodowane brakiem liniowości zachowania materiałów roślinnych nawet przy niewielkich odkształceniach.

Do opisu zachowań materiałów biologicznych konieczne jest uwzględnienie występowania różnego rodzaju błędów, w tym błędów systematycznych, przy obliczaniu parametrów modelu wynikających z braku uwzględnienia ugięcia czujnika siły. Ponadto, prędkość obciążania występująca we wstępnej fazie procesu relaksacji naprężeń powinna być adekwatna do prędkości obciążania występującej w warunkach rzeczywistych. Funkcja relaksacji naprężeń wyznaczona przy niskiej prędkości odkształcania nie zawiera składników z wysokimi prędkościami relaksacji naprężeń [Gołacki i in. 1999a, 1999b]. Dla materiałów o właściwościach lepko-sprężystych, opisanych modelem Maxwella, ze wzrostem prędkości deformacji następuje spadek wartości modułów sprężystości oraz współczynników lepkości dynamicznej. Jednocześnie wzrost prędkości deformacji powoduje zwiększenie ilości mikrouszkodzeń. Przypuszcza się, że istnieje graniczna wartość prędkości obciążania zadawanego we wstępnej fazie relaksacji, po przekroczeniu której gwałtownie rośnie stopień rozwarstwiania tkanek oraz intensywność

ność przepływu płynów wewnątrz materiału, co sprzyja występowaniu mikrouszkodzeń [Gołacki 1996].

W trakcie przechowywania bulw ziemniaka obserwowano zmiany cech reologicznych określanych w oparciu o testy pełzania. Przy wydłużaniu czasu przechowywania wartość modułów sprężystości malała, a prędkość pełzania rosła. Nie stwierdzono istotnych zmian wartości współczynników lepkości dynamicznej [Kolowca i in. 2006]. Podczas przechowywania korzeni marchwi obserwowano wzrost wartości współczynnika Poissona z 0,39–0,44 do 0,43–0,45. Metoda Hughesa i Segerlinda, wykorzystana do pomiaru wartości współczynnika Poissona dla korzenia marchwi, jest korzystna ze względu na swoją prostotę i krótki czas eksperymentu. Wadą tej metody jest konieczność starannego przygotowania próbek oraz konieczność stosowania wyższych poziomów naprężeń, ale z zakresu odkształceń zbliżonych do liniowych [Gołacki i Obroślak 1998].

Charakterystyki lepko-sprężyste materiałów roślinnych można również wykorzystywać w inny sposób, np. do wyznaczania zależności pomiędzy naprężeniami ścinającymi a cechą jakościową warzyw i owoców zwaną kruchością. Stąd wynika potrzeba kolejnych badań, które pozwolą uzupełnić brakujące ogniwa w istniejącym stanie wiedzy dotyczącym nie tylko reologii surowców rolniczych, ale i produktów przemysłu spożywczego, oraz dla pełniejszej aplikacji charakterystyk ciał lepko-sprężytych do celów praktycznych.

1.2. Metody suszenia i ich wpływ na jakość suszu

Spośród wielu kryteriów, jakie uwzględnia się przy klasyfikacji metod suszenia, Strumiłło [1983] proponuje uwzględnić następujące:

- sposób doprowadzenia ciepła: konwekcyjne, kontaktowe, radiacyjne, dielektryczne, sublimacyjne;
- charakter pracy: ciągłe, okresowe;
- postać fizyczną materiału przeznaczonego do suszenia: do cieczy, szlamu, past, materiałów twardych rozdrobnionych, do materiałów granulowanych, włóknistych;
- ciśnienie robocze: w warunkach ciśnienia atmosferycznego, w warunkach podciśnienia.

Różnorodność mechanizmów usuwania wody oraz warunków prowadzenia procesów powoduje, że każda z metod pozwala uzyskać produkt końcowy o różnej charakterystyce. Z częściej stosowanych technik suszenia można wymienić: konwekcyjne, kontaktowe, z nagrzewaniem mikrofalowym, radiacyjne, sublimacyjne, za pomocą naturalnych sorbentów, przy obniżonym ciśnieniu, rozpyłowe czy suszenie fontannowe [Błaśński i in. 1994, Kneule 1970].

Najczęściej stosowanym sposobem jest suszenie konwekcyjne wykorzystujące następujące rodzaje suszarek: suszarki komorowe, tunelowe, taśmowe, grawitacyjne, bębnowe, pneumatyczne, fluidyzacyjne. Do suszenia owoców i warzyw w formie rozdrobnionej najczęściej stosowane są suszarki tunelowe-wózkowe, taśmowe, rzadziej

fluidyzacyjne czy bębnowe [Pabis 1965]. Intensywnie badane są możliwości wykorzystywania technik suszarniczych oraz odpowiednich urządzeń powodujących możliwie najmniejszą degradację jakościową produktu: suszenie sublimacyjne czy suszenie z nagrzewaniem mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia [Kramkowski 1998, Szarycz 2001].

Obniżenie jakości produktów jest najczęściej spowodowane stosowaniem wysokich temperatur w większości konwencjonalnych sposobów suszenia. Wartość odżywcza suszu ulega istotnemu pogorszeniu. Największe straty notuje się w zawartości witaminy C, a znacznie mniejsze w zawartości witaminy B₁ i B₂. Kaloryczność suszonych produktów się nie zmienia. Jest jedynie skoncentrowana w mniejszej masie z powodu usunięcia wody. Włóknistość suszy nie zmienia się w stosunku do włóknistości surowca. Jeśli stosuje się techniki o dobrze kontrolowanych temperaturach suszenia, wówczas witamina A ulega degradacji w niewielkim stopniu. Nowe techniki pozwalają wykorzystywać niższe temperatury przy jednoczesnym skróceniu czasu trwania procesu [Aguilera i in. 2003, Cohen i Yang 1995, Kendall i in. 1998]. Techniki te powinny być dopracowane i przystosowane do szerokiego wykorzystywania w przemyśle spożywczym.

Suszenie konwekcyjne jest metodą ciągle najpowszechniej stosowaną do odwadniania płodów rolniczych na skalę przemysłową. Jest uznawane za obróbkę najbardziej destrukcyjną, znacząco pogarszającą jakość produktu w stosunku do jakości surowca. Posiada również szereg zalet, które decydują o jego szerokim wykorzystaniu w przemyśle spożywczym. Suszenie konwekcyjne należy do metod stosunkowo tanich, o dobrze poznanych podstawach teoretycznych [Pabis 1982, Janowicz 1999], a wieloletnie badania pozwoliły opracować szereg rozwiązań technicznych możliwych do wykorzystania w różnego typu suszarkach [Pabis 1994, 1984].

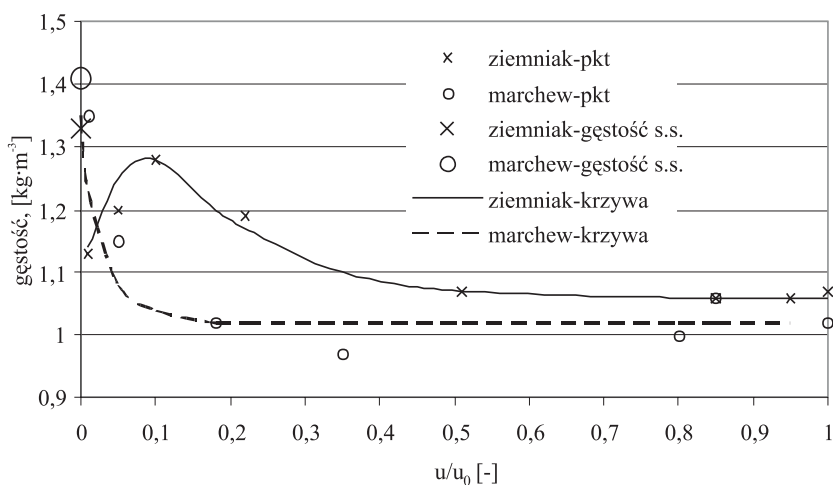
Wielkość i kształt cząstek wpływają na szybkość uzyskiwania przez suszony materiał wilgotności równowagowej. Najszybciej wilgotność równowagową uzyskuje pietruszka w postaci wiórków, zaś najwolniej w postaci sześcianów. Przy temperaturze odwadniania wynoszącej 60°C najkrócej suszy się pietruszka w formie plastrów [Skorupska 2005]. Na przebieg procesu konwekcyjnego odwadniania istotny wpływ ma również technika doprowadzania powietrza do komory. Wprowadzając złożę w stan fluidalny, znacznie poprawia się warunki wymiany ciepła i masy. Dzięki temu czas suszenia marchwi skraca się o około 30%, a w przypadku ziemniaka przyspiesza się usuwanie wody w pierwszej fazie procesu. Suszenie przez wprowadzenie złoża w stan fluidalny zwiększa ubytki karotenów w marchwi do 56% i witaminy C w ziemniakach do 51% w stosunku do suszenia konwekcyjnego z przepływem powietrza wzdłuż lub prostopadle do warstwy materiału. Straty karotenów i witaminy C mogą być znacznie niższe, jeśli podczas odwadniania wykorzystuje się metodę zapewniającą jak najkrótszy kontakt suszonego materiału z powietrzem. Suszenie w złożu fluidalnym nie powinno być wykorzystywane do odwadniania surowców zawierających labilne składniki łatwo ulegające utlenianiu [Witrowa-Rajchert i in. 2005].

W trakcie termicznego suszenia produktów rolniczych usuwana jest woda i część substancji lotnych, natomiast cukry, sole, tłuszcze i białka mogą przemieszczać się wewnątrz materiału. W rezultacie dochodzi do zmian właściwości fizycznych, w tym do skurczu suszarniczego. Teoretycznie skurcz powinien być równy ilości odparowanej

wody, lecz specyficzna budowa tkankowa materiałów biologicznych powoduje, że obserwowany skurcz najczęściej jest mniejszy niż przewidywany. Szczególnie duży skurcz suszarniczy występuje podczas odwadniania materiałów o dużej wilgotności początkowej i powinien być uwzględniany przy modelowaniu kinetyki suszenia konwekcyjnego produktów rolniczych [Pabis 1994, Murakowski 1994, Jaros 1999].

Podczas suszenia konwekcyjnego marchew kurczy się liniowo w całym zakresie względnej zawartości wody u/u_0 [Nowak i in. 1998, Krzykowski i Rydzak 2001]. Końcowa objętość suchej masy stanowi jedynie 18% objętości surowca. Skurcz ziemniaka rośnie liniowo w zakresie $u/u_0 = 0,1-1,0$. Dalsze odwadnianie nie powoduje zmian objętości.

Ze skurczem ściśle powiązana jest gęstość materiału. Gęstość marchwi suszonej konwekcyjnie nie ulega zmianie do momentu usunięcia 80% wody. Przy dalszym odwadnianiu gęstość marchwi rośnie. Gęstość ziemniaka nie zmienia się do momentu usunięcia 50% wody, dalsze odwadnianie w zakresie $u/u_0 = 0,5-1,0$ powoduje wzrost gęstości, a dla $u/u_0 < 0,1$ gęstość spada (rys. 2). Spadek gęstości ziemniaka wynika z ubytków masy przy stałej lub prawie niezmienną objętości materiału [Nowak i in. 1998].



Rys. 2. Zmiany gęstości suszonej marchwi i ziemniaka [Nowak i in. 1998]

Fig. 2. Density changes of dried carrot and potato

Suszenie materiałów roślinnych powoduje liczne zmiany fizykochemiczne. Zjawiska te decydują o przebiegu ponownego uwadniania suszy. Wpływają na przyrost masy i objętości, a także na zmiany gęstości i porowatości rehydrowanego materiału. Dynamika przyrostu masy i objętości w trakcie uwadniania jest potwierdzeniem zjawisk fizykochemicznych zachodzących podczas suszenia surowców rolniczych. Dla części surowców, takich jak jabłko, dynia i pietruszka, względny przyrost masy w trakcie uwadniania jest szybszy niż względny przyrost objętości. Oznacza to, że woda najpierw wnika do porów, co nie powoduje równoważnego przyrostu objętości. W przypadku ziemniaka woda

w pierwszej kolejności penetruje części stałe materiału, powodując pęcznienie biopolimerów i szybszy przyrost objętości niż masy. W trakcie rehydracji marchwi woda początkowo wnika do części stałych na powierzchni materiału, a dopiero w dalszej kolejności do porów [Witrowa-Rajchert 2003]. Wzrost temperatury rehydracji powoduje bardzo istotny wzrost ilości wody wchłanianej w trakcie procesu, szczególnie dla marchwi, cebuli, grzybów, ziemniaków i czosnku [Krokida i Marinou-Kouris 2003].

Rozkład komórek o zróżnicowanej powierzchni przekroju poprzecznego w odwodnionych materiałach jest jednym z istotniejszych czynników decydujących o jakości produktu, szczególnie w zakresie cech mechanicznych i reologicznych. Porowatość marchwi suszonej konwekcyjnie w temperaturze 60°C rośnie ze spadkiem zawartości wody. Szczególnie duży wzrost porowatości następuje w końcowej fazie procesu [Karathanos i in. 1996]. Powierzchnia przekroju poprzecznego komórek rośnie w początkowym okresie suszenia, a na końcowym etapie maleje. Zmiany porowatości warstwy w trakcie odwadniania wpływają na gęstość materiału, co decyduje o ich zachowaniu pod działaniem sił zewnętrznych [Lapczyńska-Kordon 2005].

Na bazie konwencjonalnych metod suszenia poszukuje się sposobów odwadniania poprawiających warunki prowadzenia procesu i polepszających jakość produktu. Jeden z kierunków badań jest związany z zastosowaniem mikrofal do nagrzewania materiału w trakcie konwekcyjnego suszenia [Andrea i in. 2004, Sanga i in. 2002, Prabhanjan i in. 1995]. Nagrzewanie mikrofalowe coraz częściej wykorzystuje się w przemyśle spożywczym do suszenia wielu produktów pochodzenia rolniczego [Sokhansanj i Yayas 1995, Szarycz i in. 2002a]. Mikrofałe stosuje się między innymi do gotowania, prażenia [Schiffman 1995], rozmrażania żywności [Strumiłło i Kudra 1986] i do suszenia [Hörsten i Karting 1999]. Nagrzewanie mikrofalowe podczas suszenia pozwala dostarczyć ciepło do całej objętości odwadnianego materiału, dzięki czemu zostaje zachowany kształt cząstek, a czas suszenia ulega znacznemu skróceniu [Kowalski i in. 2003]. Coraz częściej zaleca się stosowanie metod kombinowanych, polegających na łączeniu elementów różnych technik [Szarycz 1999].

Podobnie jak dla tradycyjnego odwadniania konwekcyjnego model kinetyki suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego powinien uwzględniać skurcz suszarniczy. Zastosowanie mikrofal do odwadniania konwekcyjnego marchwi pozwala skrócić czas suszenia o 25–90%, w zależności od temperatury powietrza i mocy mikrofal. Wpływ mocy mikrofal na czas trwania procesu jest znacznie silniejszy niż wpływ temperatury czynnika suszącego. Wzrost mocy mikrofal pogarsza barwę suszu z marchwi i może prowadzić do przypalania produktu. Z metodą mikrofalowo-konwekcyjną wiązane są duże nadzieje badaczy na opracowanie takich warunków prowadzenia procesu, przy których redukuje się część wad klasycznego suszenia konwekcyjnego, przy jednoczesnej możliwości uzyskania tańszego produktu o wymaganej jakości [Andres i in. 2004, Sanga i in. 2002, Prabhanjan i in. 1995].

Klasyczne suszenie mikrofalowe ma kilka istotnych wad: nierównomierne nagrzewanie, niekorzystne zmiany tekstury oraz ograniczenia związane z przenikaniem mikrofal do wnętrza suszonego materiału. Modyfikacje metod klasycznych pozwalają eliminować lub ograniczać istniejące wady. Badania wykazały, że nagrzewanie mikrofalowe złoza fontannowego istotnie ogranicza nierównomierność nagrzewania materiału

w trakcie suszenia [Feng i Tang 1998]. Inne modyfikacje polegają na stosowaniu nagrzewania mikrofalowego w trakcie całego procesu suszenia konwekcyjnego lub tylko w ostatniej jego fazie [Konieczna i Szarycz 1998a, b]. Natomiast suszenie mikrofalowe pod obniżonym ciśnieniem pozwala suszyć materiał przy niższych temperaturach, przez co znacznie poprawia się barwa, tekstura i zapach produktu. Metoda ta szczególnie nadaje się do odwadniania warzyw i owoców o dużej zawartości cukru [Jaroszyński 2003, Fidos 2006].

Czynnikiem decydującym o szybkości wysychania jest temperatura suszonego materiału. Podczas suszenia konwekcyjnego temperatura ta jest niższa lub co najwyżej równa temperaturze powietrza. Podczas suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego temperatura wewnątrz cząstek materiału może być kształtowana tak, aby temperatura warstw elementarnych zmieniała się w różnych fazach procesu [Szarycz 2001, Szarycz i Kramkowski 2001].

Połączenie suszenia mikrofalowego z podciśnieniem jest rozwiązaniem, które jest przez wielu badaczy wskazywane jako bardzo obiecujące, ze względu na możliwość prowadzenia procesu w sposób łagodniejszy, mniej zmieniający cechy produktu w porównaniu z podobnymi systemami pracującymi pod normalnym ciśnieniem. Zastosowanie podciśnienia w trakcie suszenia mikrofalowego wpływa znacząco na skrócenie czasu trwania procesu, zmniejsza straty energii, a przez to i koszty. Obniżenie ciśnienia w czasie suszenia powoduje wrzenie wody w niższej temperaturze, a tym samym obniżenie temperatury procesu. Dzięki temu uzyskuje się znacznie lepszą zachowalność składników odżywczych znajdujących się w utrwalanych surowcach rolniczych [Baillon i in. 1994]. Metoda ta nie jest powszechnie stosowana, głównie ze względu na braki w teoretycznym i empirycznym opisie przebiegu procesu [Pere i in. 1998, Mui i in. 2002, Sham i in. 2001].

Mikrofałe, poprzez intensywne uwalnianie energii wewnątrz suszonego materiału, powodują nagłe odparowanie wody, co z kolei przyczynia się do częstego występowania efektu „nadmuchania” materiału, nazywanego „puffingiem”. Ze względu na krótki czas trwania procesu i niską temperaturę materiału podczas suszenia – susz uzyskany tą metodą charakteryzuje się wyższą jakością niż susz otrzymywany innymi technikami [Szarycz i in. 2003].

Biorąc pod uwagę ponoszone nakłady energetyczne, suszenie mikrofalowe jest efektywniejsze niż suszenie konwekcyjne czy próżniowe. Czas suszenia mikrofalowego liści pokrzyw wynosi 4 minuty, podczas gdy suszenie konwekcyjne wymaga 30–120 minut, w zależności od temperatury czynnika suszącego (125–50°C), a suszenie próżniowe trwa 35–65 minut [Alibas 2007].

Porównanie suszenia mikrofalowego ziemniaków z suszeniem konwekcyjnym w aspekcie retencji witaminy C oraz właściwości rehydracyjnych wypada zdecydowanie na korzyść metody mikrofalowej [Khraisheh i in. 2004].

Właściwości rehydracyjne suszu uzyskanego metodą mikrofalową są korzystniejsze niż suszu uzyskanego metodą konwekcyjną, lecz w badanych zakresach parametrów prowadzenia procesu nie stwierdzono wpływu mocy mikrofal (przy suszeniu mikrofalowym) ani temperatury powietrza (przy suszeniu konwekcyjnym) na zdolność suszu ziemniaków do ponownego uwodnienia [Khraisheh i in. 2004]. Odwrotną zależność zaobserwowano

w trakcie badań owoców kiwi suszonych trzema metodami [Maskan 2001b]. Produkt uzyskany metodą mikrofalową charakteryzuje się niższą zdolnością do rehydracji niż produkt uzyskany metodą konwekcyjną lub metodą konwekcyjną z mikrofalowym dosuszaniem. Ponadto, nagrzewanie mikrofalowe powoduje zwiększenie skurczu suszarniczego owoców kiwi.

Poszukuje się nowych metod odwadniania wykorzystujących mikrofałę, które zredukowałyby chociaż część wad standardowego suszenia mikrofalowego. Najprostsze rozwiązanie polega na zastosowaniu mikrofal przy suszeniu konwekcyjnym. Badane są również możliwości wykorzystania bardziej złożonych kombinacji, gdzie nagrzewaniu mikrofalowemu towarzyszy oddziaływanie promieniami podczerwonymi lub lampami halogenowymi [Sumnu i in. 2005, Salagnac i in. 2004]. Wydaje się jednak, że największe nadzieje wiązane są z metodą mikrofalowo-podciśnieniową. Obniżenie ciśnienia w trakcie odwadniania mikrofalowego pozwala obniżyć temperaturę wrzenia wody, dzięki czemu temperatura całego procesu może być znacznie niższa. Pozostają problemy ekonomiczne związane z wysokimi kosztami aparatury oraz dużymi nakładami energetycznymi, powodowanymi głównie stosunkowo niską wydajnością magnetronów (około 50%) [Drouzas i Schubert 1996]. Z tego powodu metoda mikrofalowo-podciśnieniowa jest wykorzystywana do wytwarzania produktów, wobec których stawiane są wysokie wymagania jakościowe przy akceptowalnym poziomie kosztów.

Ważną cechą decydującą o przydatności suszy dla przemysłu spożywczego jest ilość oraz szybkość wchłaniania wody podczas uwadniania. Wielu badaczy zajmowało się problemem uwadniania suszy uzyskanych w warunkach podciśnienia [Kaleta i in. 2006, Figiel i in. 2006, Giri i Prasad 2007, Marabi i in. 2006]. Zdolność do pochłaniania wody przez susz z korzenia pietruszki rośnie ze wzrostem temperatury suszenia i spadkiem ciśnienia w instalacji [Kaleta i in. 2006]. Wzrost mocy mikrofal pogarsza właściwości rehydracyjne miąższu buraków ćwikłowych [Figiel i in. 2006]. Porównując suszenie mikrofalowo-podciśnieniowe z suszeniem konwekcyjnym w zakresie właściwości rehydracyjnych, należy stwierdzić, że zarówno dla pieczarek [Giri i Prasad 2007], jak i dla marchwi [Marabi i in. 2006] odwadnianie w warunkach obniżonego ciśnienia jest znacznie korzystniejszą metodą utrwalania warzyw.

Z doniesień literaturowych wynika, że suszenie mikrofalowo-podciśnieniowe pozwala uzyskać produkty o jakości spełniającej zastrzone kryteria. Spośród wszystkich metod wykorzystujących nagrzewanie mikrofalami jako jedyna pozwala obniżyć temperaturę procesu, co eliminuje jeden z podstawowych czynników obniżających jakość produktu. Jednocześnie zachowuje wszystkie zalety związane z wykorzystaniem mikrofal jako źródła dostarczania ciepła do suszonego materiału. Prace badawcze powinny koncentrować się na projektowaniu takich instalacji, których koszt pozwalałby wykorzystywać tę metodę na skalę przemysłową do utrwalania wielu różnych surowców, nie tylko tych najbardziej wartościowych.

Surowce oraz półprodukty pochodzenia rolniczego należą do grupy materiałów wrażliwych na obróbkę termiczną. Większość konwencjonalnych metod suszenia polega na dostarczaniu do materiału odpowiednio dużej ilości energii cieplnej, aby woda znajdująca się wewnątrz tkanek przeszła w stan gazowy i w takiej formie została usunięta. Produkty najbardziej wrażliwe można suszyć w warunkach polegających na zamrożeniu

surowca, a następnie usuwaniu wilgoci poprzez sublimację lodu w próżni. Proces taki nazywany jest suszeniem sublimacyjnym (czasami liofilizacją) i należy do grupy najbardziej zachowawczych metod utrwalania różnego rodzaju materiałów [Cohen i Yang 1995, Kramkowski 1998]. Zamrażanie, będące pierwszą fazą suszenia sublimacyjnego, ma istotny wpływ na jakość końcową produktu. Proces tworzenia kryształków lodu zależy od ilości dostępnej wody, szybkości zamrażania i temperatury ewentualnego przechowywania mrozonek. Gdy prędkość zamrażania tkanek roślinnych jest mała, wówczas powstają duże kryształki lodu, a ich rozmieszczenie wewnątrz struktury jest przypadkowe [Gomez i Sjöholm 2004, Kramkowski i in. 2001b]. Kryształki lodu tworzące się na zewnątrz komórki roślinnej „wzrastają” dzięki „wysysaniu” wody z komórek. Proces trwa do momentu uzyskania stanu równowagi pomiędzy potencjałem wody i lodu. Mechanizm ten jest odpowiedzialny za obniżanie ilości wody znajdującej się wewnątrz komórek. Im niższa jest temperatura zamrażania, tym większa ilość wody zostaje usunięta [Pearce 2001]. Prędkość zamrażania ma decydujący wpływ na stopień uszkodzenia struktury komórkowej tkanek roślinnych. Niekorzystne zmiany struktury, powodowane tworzeniem się dużych kryształów lodu, mogą być częściowo kompensowane poprzez niskotemperaturowe blanszowanie surowca (temperatura czynnika blanszującego – około 60°C przez 30 minut). Zabieg taki powoduje uaktywnianie pektyn (PME) w ścianach komórkowych, które w obecności wolnych jonów wapnia tworzą poprzeczne połączenia pomiędzy molekułami pektyn. W ten sposób tłumaczy się wzrost zwięzłości materiału [Verlinden i De Baerdemaeker 1997]. Szybkie zamrażanie powoduje tworzenie się małych kryształków lodu wewnątrz komórek, dzięki czemu woda nie musi przenikać przez błony cytoplazmatyczne. Uszkodzenia struktury komórkowej są wówczas znacznie mniejsze w stosunku do zmian występujących podczas powolnego zamrażania [Gomez i Sjöholm 2004].

Duże zainteresowanie producentów i konsumentów produktami suszenia sublimacyjnego przekłada się na liczne prace badawcze z tego zakresu [Janowicz i in. 2006, Boss i in. 2004, Lis i in. 2004, George i Datta 2002, Mastrocola i in. 1997, Kramkowski 1998].

Liczne badania wykazują, że najintensywniejsze ubytki składników odżywczych oraz pogorszenie cech sensorycznych suszy sublimacyjnych następuje w trakcie ich dosuszania. Woda powinna być wówczas utrzymywana w stanie zeszklenia, co powoduje zatrzymanie reakcji chemicznych oraz minimalizuje skurcz suszarniczy dzięki wysokiej lepkości matrycy. Temperatura materiału powinna rosnać zgodnie ze wzrostem temperatury zeszklenia. Wartość temperatury zeszklenia jest jednocześnie maksymalną temperaturą, przy której produkt w trakcie przechowywania jest stabilny [Craig i in. 1999].

Liofilizacja jest korzystniejszą metodą odwadniania niż suszenie konwekcyjne lub mikrofalowo-podciśnieniowe, również w zakresie właściwości rehydracyjnych oraz retencji substancji odżywczych marchwi. Niektóre badania dotyczące zmian barwy, tekstury i zapachu dowodzą, że suszenie sublimacyjne jest równie skuteczne jak suszenie mikrofalowo-podciśnieniowe [Kramkowski i in. 2001a, Lin i in. 1998].

Istotną zaletą suszy sublimacyjnych jest możliwość ich przechowywania w temperaturze pokojowej pod warunkiem właściwego zapakowania. Przechowywanie jabłek suszonych sublimacyjnie w środowisku o aktywności wody wynoszącej od 0,328

do 0,810 powoduje istotne uplastycznienie materiału i załamanie jego struktury. Ze wzrostem aktywności wody maleje wartość pracy potrzebnej do odkształcenia kostek jabłek, ponieważ deformacja następuje przy mniejszych wartościach sił. Obniża się twardość jabłek i maleje udział elementów sprężystych we właściwościach mechanicznych [Rowicka i in. 2002].

Wiedza o cechach mechanicznych i reologicznych produktów po uwodnieniu jest istotna ze względu na subiektywne odczucia konsumenta spożywającego dany produkt. Uwodnione produkty uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się szczególnie dużymi stratami elastyczności. Zapobiec temu można, stosując przed suszeniem obróbkę wstępną polegającą na odwodnieniu osmotycznym. Wzrost zawartości suchej substancji w materiale zwiększa jego elastyczność. Uwodnione produkty uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się pogorszonymi właściwościami lepko-sprężystymi w stosunku do produktów otrzymanych metodą konwekcyjną lub podciśnieniową. Dla obu technik suszenia właściwości lepko-sprężyste materiałów uwodnionych są zbliżone do właściwości suszy [Krokida i in. 1999].

Wielu badaczy zajmuje się takimi modyfikacjami suszenia sublimacyjnego, które pozwalają zachować wszystkie zalety tej metody przy znacznym obniżeniu kosztów [Litvin i in. 1998]. Dobre rezultaty uzyskuje się, stosując kombinacje różnych metod suszenia. Marchew odwodnioną sublimacyjnie do wilgotności 40% można poddać działaniu mikrofal przez 50 sekund, a następnie dosuszyć do wilgotności 5% podciśnieniowo lub konwekcyjnie. Susz uzyskany metodą kombinowaną charakteryzuje się taką samą barwą, wymiarami i szybkością uwadniania jak produkt uzyskany klasycznym sposobem sublimacyjnym. Natomiast czas suszenia zostaje skrócony z 9,5 h do 3,5–3,75 h. Jakość produktu uwodnionego uzyskanego metodą kombinowaną jest porównywalna z jakością świeżej marchwi po ugotowaniu.

Wykorzystując mikrofałe do ogrzewania próbek w trakcie suszenia sublimacyjnego, można skrócić czas suszenia o 1/3 lub nawet 1/2 czasu niezbędnego do standardowego suszenia sublimacyjnego. Instalacja suszarnicza jest typowa dla suszenia sublimacyjnego z dodatkowym modułem, umieszczonym w komorze suszenia, który wytwarza mikrofałe ogrzewające suszone próbki. Koszt takiej aparatury jest nieco większy w stosunku do kosztu wyposażenia standardowego, ale korzyści płynące ze zwiększenia prędkości suszenia, a przez to bardziej wydajnego wykorzystania sprzętu powodują, że aspekt ekonomiczny jest spełniony [Cohen i Yang 1995].

Podsumowując doniesienia literaturowe, suszenie sublimacyjne jest nowoczesną metodą utrwalania żywności, pozwalającą otrzymywać produkty spełniające kryteria decydujące o wysokiej jakości suszy, mogących być komponentami nadającymi potrawom odpowiedni smak, aromat i barwę. Susz otrzymany tą metodą nadaje się do długotrwałego przechowywania bez konieczności stosowania warunków chłodniczych. Właściwości suszy w trakcie przechowywania nie zmieniają się lub ulegają jedynie minimalnym zmianom, jednakże pod warunkiem zastosowania odpowiedniego opakowania.

1.3. Warunki suszenia

Warunki prowadzenia procesu są elementem charakterystycznym dla każdej metody suszenia. W szczególności dotyczy to takich parametrów jak: temperatura, wilgotność i prędkość przepływu czynnika suszącego, grubość warstwy materiału, praca we współprądzie, przeciwprądzie i prądzie skrzyżowanym przy suszeniu konwekcyjnym, ciśnienie, temperatura i prędkość zamrażania oraz temperatura nagrzewania przy suszeniu sublimacyjnym, wartość ciśnienia i temperatura podczas suszenia przy obniżonym ciśnieniu. Przeznaczenie suszy wpływa w istotny sposób na wybór metody suszenia i parametry prowadzenia procesu. Inne parametry stosowane są w odniesieniu do materiałów biologicznych przeznaczonych do siewu, inne do suszenia żywności i pasz, wreszcie inne dla surowców przemysłu chemicznego czy farmaceutycznego.

Najistotniejszym oraz najczęściej analizowanym parametrem suszenia konwekcyjnego jest temperatura czynnika suszącego [Skorupska 2005, Lis i in. 2005, Lewicki i Jakubczyk 2004]. W przypadku konwekcji wymuszonej istotne znaczenie ma prędkość i kierunek przepływu czynnika suszącego [Witrowa-Rajchert i Radecka-Wierzbicka 2005]. Kinetyka oraz szybkość suszenia zależą również od wielkości i kształtu odwadnianych cząstek oraz od sposobu dostarczenia powietrza do komory. Intensywność przebiegu procesu ma bezpośredni wpływ na jakość uzyskiwanego produktu. Wzrost temperatury konwekcyjnego suszenia korzenia pietruszki z 50 do 65°C powoduje skrócenie czasu trwania procesu przy jednoczesnym istotnym obniżeniu jakości produktu. Dalszy wzrost temperatury przyspiesza proces w niewielkim stopniu, natomiast pogorszenie jakości jest istotne [Skorupska 2005]. Konwekcyjne suszenie jabłek w temperaturze czynnika suszącego powyżej 70°C powoduje gwałtowny wzrost wartości siły potrzebnej do odkształcenia materiału. Obserwowany jest również znacznie bardziej intensywny spadek naprężenia w trakcie procesu relaksacji. Oznacza to, że w temperaturach suszenia konwekcyjnego jabłek poniżej 70°C następuje mniejsza degradacja biopolimerów, dzięki czemu właściwości mechaniczne powstałej struktury są korzystniejsze [Lewicki i Jakubczyk 2004]. Susz korzenia pietruszki uzyskany w temperaturze 55°C charakteryzuje się najwyższą zawartością kwasu L-askorbinowego i zdolnością do pochłaniania wody oraz najlepszymi cechami sensorycznymi. Zalecana temperatura konwekcyjnego suszenia korzenia pietruszki nie powinna przekraczać 60°C [Lis i in. 2005].

Podczas konwekcyjnego suszenia płodów rolniczych stosuje się różne prędkości czynnika suszącego. Najczęściej badacze dobierają prędkość przepływu powietrza eksperymentalnie dla konkretnego surowca. Jabłka suszono przy prędkościach 0,2–0,6 m·s⁻¹ [Kaya i in. 2007], czosnek – 0,8 m·s⁻¹ [Sacilik i Unal 2005], a koper i naci pietruszki – 1,1 m·s⁻¹ [Doymaz i in. 2006]. Dla przebiegu procesu ważna jest również wilgotność czynnika suszącego. Kaya i inni [2007] do konwekcyjnego suszenia jabłek zastosowali powietrze o wilgotnościach 40, 55 i 70%. Ogólny wniosek jest następujący: wzrost temperatury i prędkości przepływu powietrza oraz spadek wilgotności czynnika suszącego przyspieszają proces konwekcyjnego suszenia płodów rolniczych. Parametry procesu należy jednak dobierać indywidualnie dla konkretnego surowca, mając na uwadze konieczność osiągnięcia kompromisu pomiędzy kosztami zabiegu a jakością suszu.

Zwiększenie mocy mikrofal w trakcie odwadniania marchwi [Wang i Xi 2005] lub bananów [Maskan 2000] istotnie zwiększa szybkość suszenia, przez co obniżają się nakłady energetyczne w trakcie procesu. Im grubość próbek jest mniejsza, tym proces suszenia jest krótszy i pochłania mniej energii. Na krzywej suszenia mikrofalowego marchwi obserwuje się charakterystyczny punkt odpowiadający zawartości wody w suszonym materiale wynoszącej $1,0 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{kgss}^{-1}$. Przy zawartości wody w marchwi mniejszej niż $1,0 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{kgss}^{-1}$, te same ubytki wody wymagają znacznie większej ilości energii. Właściwości rehydracyjne suszu z marchwi pogarszają się wraz z wydłużaniem czasu trwania pierwszego okresu suszenia oraz zmniejszaniem grubości odwadnianych próbek.

Ważnym kierunkiem badań jest optymalizacja procesu suszenia sublimacyjnego traktowana jako narzędzie pozwalające dobrać takie warunki prowadzenia procesu, przy których nakłady energetyczne są możliwie niskie bez pogarszania jakości produktu. Boss i in. [2004] wykorzystali model matematyczny zaproponowany przez Liapis i Sadikoglu [1997] do optymalizacji procesu odwadniania sublimacyjnego odtłuszczonego mleka i kawy rozpuszczalnej. Badania eksperymentalne dowiodły, że można ustalić takie warunki prowadzenia procesu, w których z odwadnianego materiału usuwana jest maksymalna ilość wody w najkrótszym czasie. Czas trwania suszenia sublimacyjnego jest jednym z głównych parametrów decydujących o kosztocłonności.

Sposób dostarczania ciepła oraz temperatura płyty grzejnej w trakcie suszenia sublimacyjnego bardzo istotnie wpływają na jakość suszy. Przy radiacyjnym sposobie dostarczania ciepła wzrost temperatury płyty z 50 do 90°C pogarsza jakość zarówno suszu z marchwi, jak i materiału uwodnionego. Jakość jest definiowana jako wielkość wyznaczona w pięciopunktowej skali charakteryzująca barwę, zapach, smak i konsystencję. Ze wzrostem temperatury płyty grzejnej obniża się również zdolność do pochłaniania wody oraz zawartość β -karotenu. Porównanie metody sublimacyjnej z metodą konwekcyjną w aspekcie jakości suszy z marchwi wypada zdecydowanie na korzyść suszenia sublimacyjnego [Gawalek 2005].

Kontaktowy sposób dostarczania ciepła w trakcie suszenia sublimacyjnego znacznie przyspiesza proces, ale jednocześnie intensywniej oddziałuje na odwadniany materiał, istotnie pogarszając jego cechy, w tym wytrzymałościowe. Proces prowadzony w temperaturze płyty wynoszącej 20°C pozwala uzyskać susz z selera charakteryzujący się istotnie obniżoną wytrzymałością na ściskanie i na przecinanie [Kramkowski i in. 2001b].

1.4. Wybrane czynniki wpływające na właściwości suszy warzywnych

Oprócz warunków prowadzenia procesów związanych z usuwaniem wody z produktów rolniczych na jakość suszy ogromny wpływ ma rodzaj surowca. Istotne są jego właściwości, ale równie ważna jest postać materiału przeznaczonego do suszenia. Wiele badań wykazało istotne różnice w przebiegu procesu w zależności od wielkości i kształtu cząstek [George i Datta 2002, Górnicki i Kaleta 2007a, 2007b].

Istotnym wskaźnikiem jakości suszy jest skurcz suszarniczy [Nowak i in. 1998, Krzykowski i Rydzak 2001]. Wiele doniesień literaturowych wskazuje na istotność właściwego doboru techniki suszenia oraz parametrów prowadzenia procesu dla uzyskania najodpowiedniejszego poziomu skurczu. Zjawisko zapadania się struktury komórkowej materiałów biologicznych podczas suszenia powinno być uwzględnione przy modelowaniu kinetyki przebiegu procesu [Pabis 1994, 1999, Pabis i Jaros 2002, Murakowski 1994].

Do grupy właściwości użytkowych suszy należy zaliczyć postać i konsystencję materiału (proszek, granulata, pasta), wielkość cząstek, cechy rekonstrykcyjne, barwę, smak itd. [Nayak i in. 2006, Prakash i in. 2004, Kaleta i in. 2005, Lis i Lis 2001].

Cechy mechaniczne i reologiczne są istotnymi wskaźnikami jakości zarówno surowców, jak i suszy [Gołacki i Stropek 2001, Szot i Gołacki 1987, Krokida i in. 1999, Stępień 2007a, 2008a]. Do grupy cech mechanicznych należy zaliczyć wskaźniki obliczane w oparciu o testy ściskania, przecinania, rozciągania czy zginania [Rowicka i in. 2002, Stępień i Michalski 2006, Stępień 2007a]. Cechy reologiczne, takie jak: moduł sprężystości, współczynnik lepkości dynamicznej czy stopień elastyczności, uzyskuje się w testach relaksacji naprężeń, pełzania lub pętli histerezy odkształceń [Kolowca 2005, Kolowca i in. 2006, Bohdziewicz 2001a, 2001b, Stępień 1996, 2008a]. Właściwości mechaniczne i reologiczne surowców istotnie wpływają na przebieg suszenia, natomiast metoda oraz warunki prowadzenia procesu pozwalają modyfikować cechy suszu.

1.4.1. Struktura komórkowa suszy warzywnych

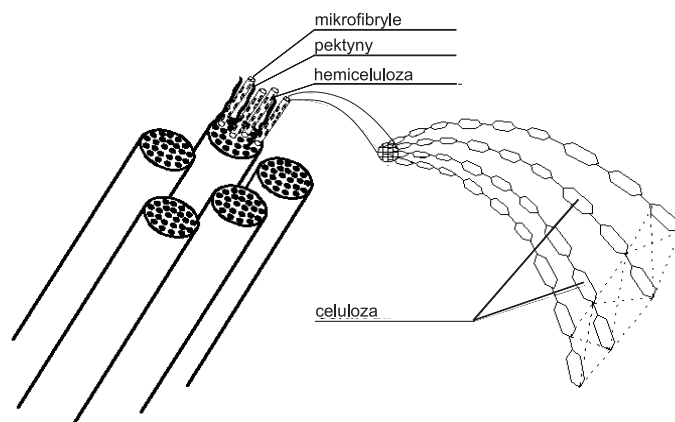
Materiały o budowie komórkowej charakteryzują się dużą porowatością wewnętrzną, co ułatwia dyfuzję pary wodnej, a w związku z tym suszenie przebiega dość szybko. Jednak w większości sposobów suszenia podczas trwania procesu dochodzi do skurczu materiału, w wyniku czego komórki tracą swój pierwotny kształt i zostaje naruszony naturalny układ tkanek.

Komórka roślinna jest rodzajem komórki eukariotycznej charakteryzującej się obecnością plastydów, silnym rozwojem wakuoli, celulozową ścianą komórkową oraz specyficznymi połączeniami, tzw. plazmodesmami – utworzonymi z pasm cytoplazmy i łączącymi wnętrza sąsiadujących ze sobą komórek [Hall i in. 1982].

Komórka roślinna zbudowana jest z protoplazmy i otaczającej ją ściany komórkowej. Błona komórkowa ograniczająca cytoplazmę oddziela wnętrze komórki od ośrodka zewnętrznego, zapobiegając wymieszaniu się zawartości komórki z substancjami ją otaczającymi. Błona ta posiada zdolności do wybiórczego przepuszczania substancji, dzięki czemu reguluje ona skład środowiska wewnętrznego komórki [Przestalski 1983]. Najbardziej charakterystycznymi elementami strukturalnymi cytoplazmy komórki roślinnej są plastydy i wakuole [Fry 1988, Woźny i in. 2001].

Protoplast komórki roślinnej otoczony jest ścianą komórkową, która nadaje mu kształt oraz chroni go przed szkodliwymi wpływami z zewnątrz, a także skutkami wewnętrznej siły – turgoru. Zasadniczymi składnikami strukturalnymi ściany komórkowej są włókna (fibryle) celulozowe zatopione w substancji podstawowej (macierzy) złożonej głównie z hemiceluloz i pektyn. W ścianach wtórnych zawartość celulozy wynosi

około 60%, natomiast w ścianach pierwotnych tylko 20%. Celuloza jest wielocukrem o długim łańcuchu zbudowanym z 1000–10000 reszt glukozy. Łańcuchy celulozy połączone w wiązki nazywane są mikrofibrylami. W pewnych obszarach mikrofibryli układ cząstek celulozy jest bardzo regularny, tworząc przestrzenną siatkę molekularną taką jak w kryształach. Obszary ścian komórkowych o krystalicznej strukturze nazywamy micelami (rys. 3) [Becker i in. 2003]. Ściany w komórce roślinnej mogą ulegać inkrustacji (węglan wapnia, krzemionka lub lignina) i adkrustacji (kutyna, suberyna, woski). Komórki roślinne zespolone są ze sobą za pośrednictwem blaszki środkowej, utworzonej z substancji pektynowych.



Rys. 3. Budowa micelarna celulozy będącej budulcem roślinnej ściany komórkowej [Becker i in. 2003]

Fig. 3. Micelle structure of cellulose that is a building material of a cell wall

Biorąc pod uwagę elastyczną strukturę ściany komórkowej, utrata wody podczas suszenia powoduje skurcz materiału. Proces suszenia w początkowym okresie sprawia, że materiał jest lepko-sprężysty i zdolny do odkształceń, jednak w miarę trwania procesu utrata wody powoduje usztywnienie ścian komórkowych oraz zwiększenie stopnia krystaliczności celulozy, a co za tym idzie, następuje jednocześnie wzrost wytrzymałości mechanicznej materiału, przez co nie ulega on dalszej deformacji [Woźny i in. 2001].

Podczas suszenia zachodzi szereg niekorzystnych zmian dotyczących struktury komórkowej odwadnianego materiału. Następuje utrata walorów sensorycznych, która jest spowodowana reakcjami chemicznymi, a zwłaszcza brązowieniem nieenzymatycznym, utlenianiem tłuszczu i denaturacją białka oraz degradacją witamin. Procesy przetwarzania, które wykorzystują obróbkę termiczną podczas usuwania wody, prowadzą niejednokrotnie do znacznego zmniejszenia wartości odżywczej produktu finalnego. Mamy wtedy do czynienia z utratą naturalnej struktury tkanek, wynikającą z sieciowania składników polimerowych i powstawania obszarów krystalicznych w amorficznych polimerach. Z tego również wynikają zmiany właściwości mechanicznych produktu [Karel 1980].

1.4.2. Wpływ blanszowania na jakość suszy

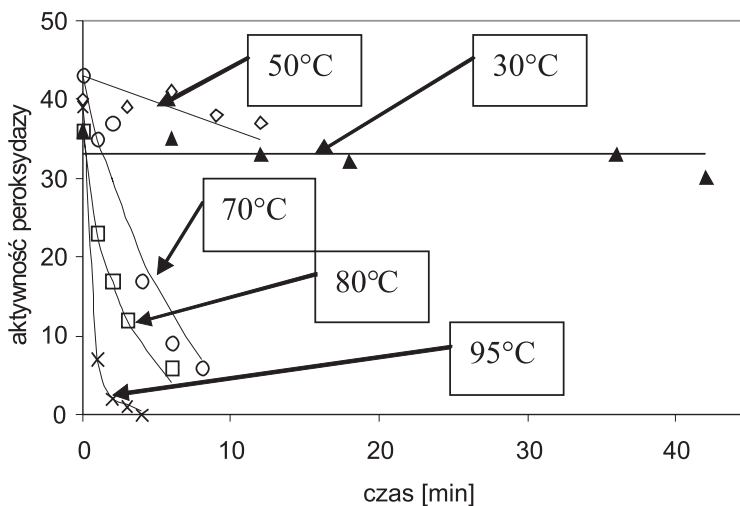
Blanszowaniem nazywamy krótkotrwały zabieg oddziaływania na surowiec medium o wysokiej temperaturze. Jest to zabieg, którego głównym celem jest zabezpieczenie surowca przed wystąpieniem niekorzystnych zmian wynikających z aktywności enzymów. Wykorzystuje się go jako obróbkę wstępną przed różnego rodzaju procesami technologicznymi, głównie przed suszeniem, ale również przed zamrażaniem. W trakcie blanszowania dochodzi do inaktywacji enzymów tkankowych poprzez termiczną denaturację ich nośników białkowych. Dodatkowymi korzyściami płynącymi z zastosowania blanszowania są [Klimczak i Irzyniec 1994a]:

- znaczne ograniczenie zanieczyszczenia mikrobiologicznego suszy,
- usunięcie powietrza z przestrzeni międzykomórkowych,
- częściowe usunięcie niektórych niepożądanych składników, np. zapachowych,
- skrócenie czasu gotowania produktu.

Blanszowanie wykonywane jest zwykle w temperaturze 70–105°C w wodzie lub w parze wodnej. Równoległe z korzyściami płynącymi z zastosowania tego zabiegu wstępnego pojawiają się pewne zjawiska negatywne. Z surowca wylugowywane są znaczne ilości witamin, soli mineralnych, węglowodanów, kwasów organicznych i niektóre składniki lotne. Ponadto, zabieg wymaga dużych nakładów energetycznych i dużych ilości wody. Z tym związany jest problem powstawania znacznych ilości ścieków, które w warunkach przemysłowych należy utylizować lub zagospodarować. Ubytki składników pokarmowych, powstałe w wyniku blanszowania, są kompensowane poprzez znaczne ograniczenie występowania tego typu strat w trakcie przechowywania gotowego produktu [Klimczak i Irzyniec 1994b].

Dla każdego materiału roślinnego należy ustalić doświadczalnie parametry blanszowania tak, aby nastąpiła wystarczająca inaktywacja enzymów przy minimalnych stratach składników pokarmowych. Nie należy blanszować produktów roślinnych, dla których metabolizm w chwili zbioru jest w stanie spoczynku. Miarą skuteczności blanszowania, wykonywanego w warunkach przemysłowych, jest ujemny wynik testu jakościowego na aktywność peroksydazy [Klimczak i Irzyniec 1994a]. Blanszowanie należy prowadzić do momentu uzyskania aktywności peroksydazy na określonym poziomie, zwanym dopuszczalnym poziomem resztowej aktywności peroksydazy. Peroksydaza może występować w dwóch formach: związanej i rozpuszczalnej. Forma związana może ulegać przemianie w formę rozpuszczalną pod wpływem temperatury [Tijssens i in. 1997], lecz mechanizm tego procesu wciąż nie jest znany. Wzrost temperatury blanszowania marchwi i brzoskwini powyżej 70°C pozwala uzyskać stabilnie niski poziom aktywności peroksydazy już po około 3 minutach. Niższe temperatury wymagają stosowania znacznie dłuższego czasu blanszowania (nawet kilkadziesiąt minut). Mimo tego w wielu przypadkach nie jest możliwe obniżenie aktywności enzymu do założonego poziomu, więc cel blanszowania nie może być osiągnięty (rys. 4) [Tijssens i in. 1997].

Czas trwania blanszowania w dużo większym stopniu wpływa na straty substancji pokarmowych niż temperatura procesu. Stąd, dla większości surowców rolniczych, zaleca się stosowanie wysokiej temperatury i krótkiego czasu blanszowania. W praktyce przemysłowej blanszowanie wodne uznaje się za korzystniejsze [Klimczak i Irzyniec 1994b].



Rys. 4. Zmiany aktywności peroksydazy w funkcji czasu blanszowania [Tijskens i in. 1997]

Fig. 4. Peroxidase activity changes versus blanching time

Wielkość strat mikroelementów, decydujących o wartości odżywczej produktu, jest jednym z kryteriów oceny efektywności blanszowania. Poszukuje się takich sposobów prowadzenia procesu, aby ubytki, np. witaminy C, były najmniejsze. Duże nadzieje wiązane są z metodą, w której roztwór blanszujący poddany jest recyrkulacji. Badania wykazały, że w takiej sytuacji straty witaminy C w tkance ziemniaka są znacznie niższe niż przy standardowym blanszowaniu w wodzie destylowanej lub w roztworze cukru o stężeniu $0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [Arroqui i in. 2001].

W trakcie blanszowania dochodzi do znacznych strat suchej substancji w wyniku dyfundowania do roztworu części rozpuszczalnych składników. Zabieg wykonywany z wykorzystaniem pary pozwala znacznie ograniczyć występowanie tego niekorzystnego zjawiska. W wodnych blanszownikach przemysłowych straty suchej substancji wahają się w granicach 11,8–13,8% dla marchwi i 12,08–14,32% dla selera. Blanszowanie w parze pozwala zredukować ilość dyfundujących składników do poziomu 7,2–8,3% dla marchwi i 7,34–8,69% dla selera [Domagała 1995, Domagała i Janus 1993]. Wydłużanie czasu blanszowania i wzrost temperatury procesu są ściśle związane ze wzrostem strat rozpuszczalnych składników suchej substancji zarówno marchwi, jak i selera.

Proces blanszowania może być wykonywany w warunkach braku dostępu powietrza i w warunkach nasycenia tlenem. Ma to istotne znaczenie dla zachowania β -karotenu w marchwi. Większą stabilność karotenoidów uzyskuje się, jeśli wysokotemperaturowe blanszowanie jest realizowane w warunkach beztlenowych. Wzrost temperatury blanszowania, przy dostępie tlenu, z 50 do 95°C istotnie obniża zawartość β -karotenu w korzeniach marchwi [Mayer-Miebach i Spiess 2003]. Bez względu na metodę suszenia

marchwi blanszowanej w trakcie przechowywania suszu następują istotne ubytki β -karotenu, co wykazali Prakash i in. [2004]. Jeszcze istotniejszym czynnikiem obniżającym zawartość β -karotenu w marchwi blanszowanej jest czas przechowywania suszu, co potwierdzili Zhao i Chang [1995]. Prakash i in. [2004] wykazali, że spośród trzech badanych metod suszenia marchwi blanszowanej suszenie fluidyzacyjne jest zdecydowanie najkorzystniejsze. Produkt charakteryzuje się najlepszą barwą, najwłaściwszymi cechami sensorycznymi oraz bardzo dobrymi właściwościami rehydracyjnymi.

Blanszowanie marchwi w postaci kostek i pietruszki w formie plastrów powoduje zwiększenie prędkości suszenia konwekcyjnego, przez co istotnie skraca się czas trwania procesu [Górnicki i Kaleta 2007a, 2007b]. Dla obu warzyw kinetykę suszenia w pierwszym okresie procesu najbardziej poprawiło blanszowanie we wrzącej wodzie przez 6 minut, nieco mniejszy wpływ zanotowano dla blanszowania we wrzącej wodzie przez 3 minuty, natomiast najmniejszy wpływ na prędkość suszenia miało blanszowanie we wrzącym 5% roztworze chlorku sodu przez 3 minuty. Odniesienie początkowych prędkości suszenia surowca blanszowanego do prędkości suszenia materiału kontrolnego (nieblanszowanego) wykazuje jednoznacznie korzystny wpływ różnych warunków blanszowania na przebieg konwekcyjnego suszenia tylko marchwi [Górnicki i Kaleta 2007a]. Blanszowanie korzenia pietruszki w 5% roztworze chlorku sodu przez 3 minuty obniża prędkość suszenia w początkowej fazie procesu w stosunku do materiału kontrolnego. Nie stwierdzono wpływu którejkolwiek z proponowanych metod blanszowania na ubytki wilgoci w trakcie suszenia konwekcyjnego tego surowca [Górnicki i Kaleta 2007b].

Wydłużenie czasu blanszowania we wrzącej wodzie korzenia pietruszki z 3 do 6 minut powoduje zwiększenie względnego przyrostu masy w czasie rehydracji suszu z 4,44 do 4,85 [Kaleta i in. 2005]. Próbkę blanszowaną w stosunku do nieblanszowanych charakteryzują się wyższymi równowagowymi względnymi przyrostami masy w trakcie uwadniania. Oznacza to, że proces blanszowania wpływa korzystnie na ilość wody, jaka może być wchłonięta w trakcie rehydracji pietruszki suszonej konwekcyjnie. Wniosek ten znajduje również swoje potwierdzenie w badaniach rehydracji pietruszki suszonej sublimacyjnie [Surma i in. 2006].

Wpływ blanszowania na kinetykę suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem marchwi badali Arevalo-Pinedo i in. [2007] oraz pietruszki Szarycz i in. [2003]. Na szybkość suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem marchwi większy wpływ ma wartość podciśnienia niż rodzaj zastosowanej obróbki wstępnej. Ponadto, blanszowanie powoduje wzrost wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wilgoci. Do odmiennego wniosku doszli Szarycz i in. [2003]. Zauważyli, że blanszowanie pietruszki nie wpływa na wartość wykładnika funkcji wykładniczej opisującej II okres suszenia mikrofalowo-podciśnieniowego, przez co nie ma wpływu na wartość współczynnika dyfuzji wody. Blanszowanie spowodowało wzrost początkowej zawartości wody w korzeniu pietruszki w stosunku do materiału świeżego. W konsekwencji szybkość suszenia w I okresie była wyższa.

Podjęmowano próby blanszowania surowców w roztworach różnego typu. Z reguły jako próbę kontrolną, czyli taką, do której odnosi się uzyskane wyniki, traktuje się materiał nieblanszowany lub blanszowany w wodzie destylowanej o określonej temperaturze. Severini i in. [2005] zaproponowali blanszowanie kostek ziemniaka

w roztworze NaCl, w roztworze mieszaniny glukoza-NaCl i blanszowanie mikrofalowe w wodzie destylowanej. Prędkość suszenia, zmiany barwy oraz zdolność absorpcji wody badano dla ziemniaków suszonych konwekcyjnie w piecu mikrofalowym i w suszarce taśmowej. Biorąc pod uwagę wszystkie trzy kryteria oceny, stwierdzono, że najwyższą jakością charakteryzuje się susz z ziemniaków blanszowanych mikrofalowo i następnie suszonych w suszarce taśmowej. Suszenie w suszarce taśmowej może nawet korygować ewentualne negatywne skutki procesu blanszowania. Brązowienie produktu najszybciej postępuje, gdy ziemniaki są blanszowane w roztworze mieszaniny glukozy i NaCl, a następnie suszone w piecu mikrofalowym. Niezależnie od sposobu blanszowania najkorzystniejszymi własnościami rehydracyjnymi charakteryzują się susze odwadniane w suszarce taśmowej.

Lis i Lis [2001] suszyli konwekcyjnie śliwki blanszowane w 2% roztworze NaOH w 95°C przez 15 s oraz śliwki blanszowane w wodzie i parze. Susz uzyskany ze śliwek poddanych ługowaniu charakteryzuje się zdecydowanie najwyższą zdolnością do rehydracji oraz najwyższą zawartością wody i wilgotnością po rehydracji. Czas konwekcyjnego suszenia śliwek „ługowanych” był trzykrotnie krótszy od czasu potrzebnego do wysuszenia śliwek blanszowanych w wodzie lub w parze. „Ługowanie” spowodowało spadek zawartości witaminy C o 37% i grubości materiału o 10%.

Blanszowanie owoców kiwi powoduje istotne zmiany w ich strukturze komórkowej. Powoduje pęcznienie ścian, co doprowadza do oddzielania się blaszki środkowej [Gerschenson i in. 2001].

Podjęto próby łączenia blanszowania z innymi zabiegami, w celu poprawy jakości produktu. Wśród dodatkowych czynności wykonano moczenie przez 30 minut w roztworze sacharozy o różnym stężeniu (5, 20 i 60%), moczenie w 1% roztworze wodorosiarczanu sodowego przez 1 s lub mrożenie w temperaturze -20°C przez 60 h. Sześciennie próbki marchwi poddane różnym zabiegom wstępnym suszono fluidyzacyjnie. Stwierdzono, że czas suszenia marchwi blanszowanej, a następnie moczonej w roztworze sacharozy o różnym stężeniu, uległ znacznemu skróceniu. Jeśli jednak weźmie się pod uwagę fakt, iż w trakcie moczenia nastąpiło częściowe odwodnienie, to należy stwierdzić, że rzeczywiste ubytki wilgoci są wolniejsze. Zdecydowanie najlepsze właściwości rehydracyjne posiada materiał moczony w 5% roztworze sacharozy. Wzrost stężenia roztworu z 5 do 60% powoduje ponad dwukrotne zmniejszenie ilości wody wchłanianej przez marchew w trakcie uwadniania [Mazza 1983].

Moreno i inni [2000] badali wpływ zabiegu kombinowanego, polegającego na wykonaniu kolejno blanszowania i odwadniania osmotycznego, na jakość truskawek (aktywność wody, pH, barwa, zwięzłość i mikrostruktura). Odwadnianie osmotyczne wykonane po blanszowaniu istotnie obniżyło aktywność wody poprzez wzrost zawartości sacharozy. Niekorzystnym zmianom ulega zwięzłość i barwa truskawek. Jednakże, uzyskano większą stabilność mikrobiologiczną produktu. Duże zmiany struktury wewnętrznej, obserwowane na zdjęciach mikroskopowych, nie znalazły potwierdzenia w badaniach cech mechanicznych truskawek.

Obróbka wstępna przed suszeniem, w tym blanszowanie, nie pozostaje bez wpływu na cechy wytrzymałościowe suszu i materiału otrzymanego po uwodnieniu. Suszenie sublimacyjne korzenia pietruszki istotnie obniża wytrzymałość na ściskanie w stosunku

do wytrzymałości surowca. Wysoka temperatura występująca w trakcie blanszowania powoduje niekorzystne zmiany w micelarnej budowie ścian komórkowych, co dodatkowo obniża odporność na ściskanie. Wytrzymałość na przecinanie suszu uzyskanego z pietruszki blanszowanej jest niższa od wytrzymałości pietruszki nie poddanej zabiegowi wstępnemu. Materiał uzyskany po rehydracji z surowca blanszowanego charakteryzuje się nieco wyższą odpornością na przecinanie niż uwodniony produkt pochodzący z pietruszki nieblanszowanej [Stępień i Michalski 2006].

1.4.3. Wpływ odwadniania osmotycznego na jakość suszy

Odwadnianie osmotyczne znajduje szerokie zastosowanie jako samodzielny zabieg, prowadzący do uzyskania gotowego produktu o obniżonej zawartości wody w stosunku do surowca i charakteryzującego się pożądanymi cechami. Przemysłowe wykorzystanie jest możliwe w połączeniu z suszeniem lub zamrażaniem. Odwadnianie osmotyczne jest wówczas zabiegiem wstępnym, mającym przygotować surowiec do dalszej obróbki, jednocześnie znacznie wpływając na cechy finalnego wyrobu. Ekonomia procesu zależy od zastosowania tanich i łatwo dostępnych substancji osmoaktywnych.

Odwadnianie osmotyczne znalazło najszersze zastosowanie do usuwania wody z owoców, ze względu na łatwość wykorzystania cukrów jako związków osmoaktywnych. Produkt końcowy zawsze zawiera pewną ilość wody, która może być łatwo usunięta poprzez zastosowanie konwencjonalnych metod suszenia. Substancje, które można wykorzystać do odwadniania osmotycznego, muszą być zdolne do wytworzenia odpowiednio wysokiego ciśnienia osmotycznego, powinny one też mieć przyjemny smak i zapach, ale nie powinny być toksyczne. Przy dużej różnicy ciśnień pomiędzy roztworem i sokiem komórkowym, która ma miejsce szczególnie na początku procesu, może nastąpić dysfunkcja półprzepuszczalności przez błony ścian komórkowych. Dzieje się tak z powodu dużej intensywności procesu w pierwszej fazie, co powoduje oblepianie się cukru na powierzchni materiału. Pożądane jest wówczas spowolnienie tempa przebiegu odwadniania osmotycznego, do czego często wykorzystuje się krochmal. Identyczny problem pojawia się przy odwadnianiu z wykorzystaniem soli kuchennej, która również daje wysokie ciśnienie osmotyczne [Lenart 1976].

Podczas odwadniania osmotycznego ma miejsce skomplikowany proces przepływu wody z komórki do roztworu osmotycznego oraz transport substancji osmoaktywnej do wnętrza materiału. Przebieg tego procesu zależy od wielu czynników zewnętrznych takich jak: rodzaj substancji osmoaktywnej, stężenie roztworu, temperatura i czas trwania procesu oraz od czynników wewnętrznych zależnych od rodzaju i stanu struktury komórkowej odwadnianego surowca. Dochodzi do wielu interakcji pomiędzy poszczególnymi czynnikami, co mocno komplikuje opis przebiegu procesu. Jednakże wielu badaczy podejmowało próby opisu kinetyki transportu masy w trakcie odwadniania osmotycznego [Yao i Le Maguer 1998, Ghosh i in. 2004, Azuara i in. 1992, Kowalska i Lenart 2001].

Niektóre produkty żywnościowe pokrywa się błonami półprzepuszczalnymi, powstającymi w kąpieli surowca w niskometylowanej pektynie lub pektynie sodu, a następnie w roztworze CaCl_2 . Tak przygotowany materiał może być suszony w strumieniu ciepłego powietrza. Membrany powinny być jadalne, łatwe w nakładaniu, odporne

na uszkodzenia, powinny mieć odpowiednią selektywność i chronić produkt przed niepożądaną utratą składników podczas uwadniania [Lenart 1976].

Owoce odwodnione osmotycznie nadają się szczególnie do suszenia próżniowego. Produkt charakteryzuje się jasną barwą, szybko można osiągnąć założony poziom wilgotności, lepiej zachowany jest naturalny zapach. Ponadto, ze względu na kruchość, miodowy smak i obniżoną kwasowość, nadaje się do bezpośredniej konsumpcji [Lenart 1976]. Pożądane właściwości lepko-sprężyste jabłek odwodnionych w roztworze glukozy potwierdzają badania Martineza i in. [2007].

Odwodnienie osmotyczne surowców o budowie tkankowej bardzo istotnie zmienia wielkość i kształt zarówno komórek, jak i przestrzeni międzykomórkowych [Lewicki i in. 2005, Yao i Le Maguer 1996, Kowalska i Lenart 2005]. Nie stwierdzono, aby zabieg powodował pękanie ścian komórkowych w tkankach jabłek. Przyczynia się jednak do istotnego zwiększenia liczby małych komórek, a także obniża wartość parametru charakteryzującego kształt. Komórki znajdujące się wokół przestrzeni międzykomórkowych reagują na stres osmotyczny inaczej niż komórki ulokowane w sąsiedztwie innych komórek. Odwodnienie osmotyczne jabłek w 61,5% roztworze sacharozy przez 120 minut powoduje wzrost obwodu przestrzeni międzykomórkowych, co jest spowodowane skurczem komórek i deformacją ścian [Lewicki i in. 2005]. Przestrzenie międzykomórkowe tkanek poddanych zabiegowi wstępnemu stają się bardziej nieregularne niż te, które występują w surowcu. Dłuższe odwadnianie osmotyczne powoduje rozerwanie części komórek oraz rozwarstwienie blaszki środkowej, co oznacza, że zbyt długo trwający proces jest niekorzystny, bo powoduje niszczenie ciągłości struktury tkanek [Kowalska i Lenart 2005].

Analiza przebiegu skurczu pojedynczej komórki ziemniaka odwadnianego osmotycznie w roztworze manitolu ($0,535 \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-3}$) w temperaturze 20°C wykazała, że proces można podzielić na trzy fazy. Faza I rozpoczyna się od stanu pełnego turgoru do plazmolizy. Faza II trwa od momentu wystąpienia plazmolizy do chwili pojawienia się pierwszych oznak zapadania się ścian komórkowych. Faza III obejmuje zjawiska zachodzące po fazie II. W trakcie fazy I powierzchnia komórek i przestrzeni międzykomórkowych zmienia się minimalnie. W fazie II powierzchnia wewnętrzna komórki się zmniejsza, ale jest to kompensowane wzrostem powierzchni przestrzeni międzykomórkowych. W fazie III zmiany kształtu komórek ziemniaka są podobne do zmian występujących w fazie I [Yao i Le Maguer 1996].

Kowalska i Lenart [2005] badali zmiany struktury tkanki roślinnej poddanej odwodnieniu osmotycznemu na przykładzie jabłek i marchwi. Jako kryterium oceny przyjęli wartości współczynnika kształtu i średnicy Fereta. Cieczami osmotycznymi były roztwory glukozy, sacharozy i syropu skrobiowego. Proces prowadzono w temperaturach 30 , 50 i 80°C przez 180 minut. Średnia średnica komórki jabłek poddanych obróbce wstępnej zmniejszyła się o około 5–18% w stosunku do średnicy surowca ($110 \mu\text{m}$). Dla marchwi spadek wartości średniej średnicy wynosił 20–30%. Odwodnienie osmotyczne badanych surowców również obniżyło wartości współczynnika kształtu: dla jabłka z 0,80 do 0,71–0,74 i dla marchwi z 0,84 do 0,55–0,68, niezależnie od zastosowanego roztworu osmotycznego. Za najkorzystniejszą temperaturę procesu uznano 50°C dla jabłek i 30°C dla marchwi oraz sacharozę jako substancję osmoaktywną.

Właściwości rehydracyjne plasterów marchwi odwodnionych osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym badali Rastogi i in. [2004]. Temperatura czynnika suszącego wynosiła $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Próbkę suszono do uzyskania wilgotności równowagowej. Odwodnienie osmotyczne surowca wykonano w roztworze sacharozy o stężeniach 5, 10, 20, 40, 60°Brix w temperaturze $25 \pm 1^\circ\text{C}$ przez 5 h. Rehydrację wykonano w wodzie o temperaturze $25 \pm 1^\circ\text{C}$ przy zachowaniu stałego stosunku objętościowego suszu do medium uwadniającego wynoszącego 1:25. Wyznaczono krzywe zmian zawartości wody i ilości suchej substancji w czasie rehydracji. Marchew wstępnie odwodniona w roztworze o stężeniu do 10°Brix charakteryzuje się mniejszymi ubytkami masy i wyższą zawartością wody w trakcie całego procesu uwadniania w stosunku do próbki kontrolnej (sus z marchwi niepoddanej zabiegowi wstępnemu). Wyższe stężenia roztworu (20°Brix i więcej) pozwalały uzyskać produkt, który wykazywał się większymi ubytkami masy i niższą zawartością wody w trakcie rehydracji w odniesieniu do próbki kontrolnej. Zaobserwowane różnice interpretowane są jako wpływ stresu osmotycznego zaburzającego przepuszczalność błon komórkowych, a graniczne stężenie roztworu znajduje się w przedziale $10\text{--}20^\circ\text{Brix}$. Ponadto, wzrost strat suchej substancji jest spowodowany interakcją pomiędzy materiałem osmoaktywnym i elementami składowymi komórki marchwi.

Wpływ odwadniania osmotycznego w roztworze sacharozy na zmiany tekstury, mikrostruktury i właściwości rehydracyjne jabłek suszonych konwekcyjnie z nagrzewaniem mikrofalowym badali Prothon i in. [2001]. Temperatura suszenia wynosiła 50, 60 i 70°C . Proces prowadzono do osiągnięcia wilgotności produktu na poziomie 10%. Jabłka odwadniano osmotycznie przez 16 h w temperaturze 22°C . Rehydrację wykonano w wodzie destylowanej o temperaturze 20°C przez 14 h oraz w naturalnym jogurcie o temperaturze 4°C przez 24 h. Teksturę produktu definiowano jako maksymalną wartość siły w teście ściskania penetratorem o średnicy 2,5 mm przy prędkości zadawania obciążenia wynoszącej 2 mm/s. Wykonanie zabiegu wstępnego pozwoliło skrócić czas suszenia jabłek w stosunku do czasu suszenia próbek niepoddanych zabiegowi wstępnemu. Przyczynia się do tego obecność sacharozy w odwodnionych tkankach, która przedostała się do materiału w trakcie odwadniania osmotycznego. Po uwodnieniu najkorzystniejszą zwięzłością charakteryzowały się próbki wstępnie odwodnione przed suszeniem w temperaturze 50°C . Ponadto, odwodnienie osmotyczne powoduje zmniejszenie grubości ścian komórkowych jabłek, co wykazano w oparciu o analizę zdjęć mikroskopowych. Wyższą zdolnością do rehydracji w wodzie charakteryzują się próbki niepoddane zabiegowi wstępnemu. Podczas uwadniania jabłek w jogurcie nie wystąpiły istotne różnice w ilości absorbowanej cieczy pomiędzy próbkami odwodnionymi osmotycznie i próbkami niepoddanyymi zabiegowi wstępnemu.

Odwadnianie osmotyczne jabłek i ziemniaków przed suszeniem konwekcyjnym istotnie wpływa na przebieg krzywych suszarniczych, bez względu na temperaturę i czas trwania zabiegu oraz rodzaj i stężenie roztworu [Janowicz i Lenart 2005, Lewicki i in. 2002, Biswal i in. 1997]. Czas suszenia konwekcyjnego jabłek wstępnie odwodnionych ulega wydłużeniu o około 35–50%. Ze względu na równowagową zawartość wody optymalny czas odwadniania nie powinien przekraczać 3 h, a temperatura roztworu 30°C [Janowicz i Lenart 2005]. Jony wapnia wprowadzone do struktury tkanki ziemniaka

w trakcie moczenia i/lub odwadniania osmotycznego w roztworze CaCl_2 silnie wpływają na kinetykę suszenia konwekcyjnego i rehydrację suszu. Wchodzą w interakcje z pektynami, powodując wzrost odporności mechanicznej produktu. Najwyższą jakością charakteryzuje się susz uzyskany z ziemniaków moczonych przez 24 h w 2% roztworze CaCl_2 , a następnie odwodnionych osmotycznie w 61,5% roztworze sacharozy. Jony wapnia zmniejszają zdolność polimerów do uwadniania, czym tłumaczy się słabe właściwości rehydracyjne suszu ziemniaczanego [Lewicki i in. 2002].

Właściwości reologiczne jabłek odwodnionych osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym ulegają istotnym zmianom w stosunku do surowca. Wnikanie substancji osmoaktywnych do tkanek owoców odwadnianych w roztworach cukru powoduje wzrost udziału elementów lepkich w lepko-sprężystym modelu reologicznym, co wykazali Lewicki i Łukaszuk [2000]. Cechy reologiczne badano dla jabłek odwodnionych osmotycznie w 61,5% roztworze sacharozy, w temperaturze 30°C przez 3 h, a następnie suszonych konwekcyjnie w temperaturze 70°C przy prędkości przepływu powietrza wynoszącej 1,5 m/s. Dla porównania testy relaksacji naprężeń wykonano również dla jabłek poddanych działaniu 0,5% kwasu cytrynowego przed suszeniem konwekcyjnym przy analogicznych parametrach procesu. Cukier z roztworu osmotycznego przedostaje się do tkanek jabłek, przez co zwiększa się ilość płynów o cechach lepkich, powodujących większą podatność na odkształcenia, niż to ma miejsce w tkankach produktu niepoddanego osmozie. W produkcie pochodzącym z jabłek poddanych odwadnianiu osmotycznemu przed suszeniem konwekcyjnym lepiej zachowane są elementy sprężyste modelu reologicznego niż w materiale uzyskanym z jabłek poddanych działaniu kwasu cytrynowego.

Owadnianie osmotyczne wykonane w warunkach podciśnienia powoduje znacznie mniejsze pogorszenie właściwości teksturalnych niż zabieg prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym. W trakcie zabiegu dochodzi do znacznego zmniejszenia ilości wody związanej występującej w tkankach owoców kiwi, co istotnie zmienia cechy reologiczne materiału. Ważnym czynnikiem determinującym właściwości reologiczne jest stan dojrzałości tkanek, ponieważ komórki dojrzałe i niedojrzałe mogą charakteryzować się krańcowo różnymi cechami [Gerschenson i in. 2001].

1.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Podstawowym celem suszenia surowców rolniczych jest usunięcie z nich wody, co w efekcie przyczynia się do stworzenia właściwych warunków do długotrwałego przechowywania. Konieczność magazynowania produktów pochodzenia rolniczego wynika głównie z sezonowości pozyskiwania płodów rolniczych. Usunięcie wody ze świeżego produktu nie jest obojętne dla jego charakterystyki i wiąże się z licznymi pozytywnymi i negatywnymi konsekwencjami.

Suszenie surowców rolniczych było i nadal jest przedmiotem dużego zainteresowania badaczy, co ma swoje odzwierciedlenie w licznych, krajowych i zagranicznych, doniesieniach literaturowych. Mnogość technik usuwania wody z materiałów o strukturze komórkowej sprawia, że przebieg procesu jest ściśle związany z zastosowaną metodą.

Odmienność zjawisk fizycznych wykorzystywanych w poszczególnych metodach suszenia powoduje, że ten sam surowiec, po usunięciu wody, może charakteryzować się innymi cechami.

Zgodnie z przytoczoną literaturą na przebieg suszenia duży wpływ mają cechy surowca zależne od: gatunku, odmiany, warunków klimatycznych, warunków glebowych, nawożenia oraz wielu innych czynników. Obróbka wstępna surowca wykonywana przed suszeniem może być traktowana jako zabieg, podczas którego właściwości surowca ulegają istotnej modyfikacji.

Badania naukowe obejmujące przedmiotowy zakres można podzielić na dwie zasadnicze grupy: badania dotyczące przebiegu procesu oraz badania jakości produktów. Wielu badaczy zajmowało się oceną jakości produktów uzyskanych poprzez suszenie różnymi metodami. Istotą każdej oceny jest przyjęte kryterium. Najczęściej badano wpływ parametrów poszczególnych technik suszenia na: zawartość witamin i substancji odżywczych, smak, barwę, zapach, pH, właściwości rekonstruktoryjne. Znacznie rzadziej natomiast zajmowano się badaniem tekstury. Ogromna większość badań dotyczy jakości suszy, bez uwzględnienia cech materiału po ponownym uwodnieniu. Mając na uwadze odczucia konsumenta spożywającego produkty żywnościowe, należy przyjąć, że cechy mechaniczne i reologiczne należą do grupy cech, które w największym stopniu decydują o akceptacji lub negatywnej ocenie danego materiału. Produkty suszenia są najczęściej spożywane po ponownym uwodnieniu. Stąd wniosek, że znajomość cech, w tym mechanicznych i reologicznych, materiałów uwodnionych jest również istotna.

Przedstawiona literatura jednoznacznie wskazuje na dużą lukę w wiedzy z przedmiotowego zakresu. Cechy mechaniczne i reologiczne badano głównie dla surowców ze względu na konieczność ich transportu, przechowywania i przetwarzania. Stosunkowo nieliczne doniesienia literaturowe dotyczą cech mechanicznych i reologicznych w odniesieniu do suszy, natomiast charakterystyki materiałów po ponownym uwodnieniu w niewielkim zakresie były przedmiotem zainteresowania badaczy.

2. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU BADAWCZEGO I HIPOTEZY ROBOCZE

Jak wynika z przeglądu literatury, suszone tkanki roślinne ulegają intensywnym przemianom, których stopień zależy od metody suszenia, parametrów prowadzenia procesu, rodzaju tkanek oraz od zastosowania zabiegów wstępnych. Odporność na działanie sił zewnętrznych żywych komórek jest sumą wytrzymałości ścian komórkowych i turgoru, czyli ciśnienia hydrostatycznego wywieranego przez protoplast. Po usunięciu wody z komórek znika wpływ związany z ciśnieniem hydrostatycznym, a wytrzymałość mechaniczna suszu zależy głównie od zachowania nienaruszonej struktury ścian komórkowych. Podstawowym budulcem ścian komórkowych są wiązki łańcuchów celulozowych zanurzone w odpornej na ściskanie amorficznej matriks. Całą strukturę podtrzymuje sieć wiązań kowalencyjnych lub wodorowych. Micelną strukturą ścian komórkowych są te obszary mikrofibryli, w których układ cząstek celulozy tworzy przestrzenną siatkę molekularną. Stan sieci celulozowo-hemicelulozowej w 70% decyduje o wytrzymałości mechanicznej całej struktury. Komórki roślinne w tkance połączone są blaszką środkową będącą warstwą silnie cementującą poszczególne komórki. Jednym z istotnych czynników osłabiających siły spajające blaszki środkowej jest wysoka temperatura [Wojtaszek i in. 2006, 2007, Horubała 1975].

Dotychczasowe badania własne autora wykazały duży wpływ metody suszenia, parametrów prowadzenia procesu oraz zabiegów wstępnych na wytrzymałość na ściskanie i przecinanie produktu oraz na jego cechy reologiczne [Stępień 2006, 2007a, 2008a].

W związku z tym, sformułowano następujące hipotezy robocze:

- H₁. Wytrzymałość mechaniczna i cechy reologiczne warzyw poddanych suszeniu zależą głównie od stanu zachowania micelarnej struktury ścian komórkowych.
- H₂. Wysoka temperatura stosowana podczas zabiegów wstępnych oraz w trakcie suszenia obniża wytrzymałość mechaniczną produktu poprzez częściowe rozpuszczenie blaszki środkowej oraz destrukcyjne oddziaływanie na wiązania kowalencyjne.
- H₃. Wnikanie związków chemicznych do przestrzeni międzymicelarnej istotnie zmienia wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na przecinanie zarówno suszy, jak i materiałów ponownie uwodnionych.

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań była ocena możliwości wykorzystania podstawowych testów wytrzymałościowych i reologicznych jako metod oceny jakości suszy oraz materiałów uwodnionych w aspekcie zmian struktury wewnętrznej. Powyższy cel zrealizowano poprzez wyznaczenie wpływu różnych metod suszenia i zabiegów wstępnych na wybrane cechy mechaniczne i reologiczne warzyw. Weryfikacja sformułowanych hipotez wymagała postawienia następujących celów szczegółowych:

1. Opisanie wpływu metody suszenia na wybrane cechy mechaniczne i reologiczne warzyw korzeniowych.
2. Opisanie wpływu zabiegów wstępnych wykonywanych przed suszeniem na wybrane cechy mechaniczne i reologiczne warzyw korzeniowych.
3. Opisanie wpływu czasu przechowywania suszu w warunkach próżniowych na wybrane cechy mechaniczne i reologiczne warzyw korzeniowych.

Cechy mechaniczne i reologiczne wyznaczono w oparciu o następujące testy:

- ściskania suszy uzyskanych trzema metodami oraz materiałów ponownie uwodnionych,
- przecinania suszy uzyskanych trzema metodami oraz materiałów ponownie uwodnionych,
- relaksacji naprężeń suszy uzyskanych trzema metodami oraz materiałów ponownie uwodnionych.

Materiał suszono trzema metodami:

- konwekcyjną,
- sublimacyjną,
- mikrofalowo-podciśnieniową (w warunkach obniżonego ciśnienia).

Przyjęto następujące warianty zabiegów wstępnych:

- blanszowanie,
- odwadnianie osmotyczne,
- brak obróbki.

Wpływ próżniowego przechowywania suszy analizowano po upływie następujących okresów magazynowania produktów:

- bezpośrednio po suszeniu,
- 6 miesięcy,

- 12 miesięcy,
- 18 miesięcy.

Materiał badawczy stanowiły trzy popularne warzywa korzeniowe:

- marchew,
- pietruszka,
- seler.

4. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

4.1. Materiał badawczy

Do badań wytypowano trzy warzywa korzeniowe, powszechnie wykorzystywane w diecie człowieka: marchew, pietruszkę i seler. Marchew i pietruszka są warzywami cenionymi szczególnie ze względu na walory smakowe i odżywcze, natomiast seler jest chętnie stosowany w kompozycjach smakowych. Jednocześnie każdy z obiektów badań spełnia warunek szerokiej dostępności na rynku płodów rolnych, co pozwalało na pozyskiwanie próbek z jednej uprawy. Jest to istotne ze względu na konieczność uogólniania wyników. Szczegółowe dane dotyczące warunków prowadzenia poszczególnych upraw uzyskano od producentów.

Badaniom poddano marchew odmiany *Cezaro* pochodzącą z jednego pola o glebie klasy 4b. Przed wysianiem pole nawożono saletrzakiem w ilości $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ i siarczanem potasu w ilości $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Nasiona wysiano w połowie maja 2004 r. W okresie od maja do końca lipca wykonano opryski następującymi preparatami: Nurelle 1L+Diazol 0,5 Lb, Super Targa 2L+Olejna 1,5L, Linurex 3L oraz Diazol 1L+Amistar 0,5L+Asami 0,5L. Plon zebrano w pierwszych dniach października i zmagazynowano w chłodni o temperaturze powietrza wynoszącej $3^{\circ}\text{C}\pm 0,5$.

Do badań korzenia pietruszki wytypowano odmianę *Eagle F1* pochodzącą z jednego pola o glebie klasy 4a. Gleba średnio zwięzła została głęboko uprawiona, a w momencie wysiewu nasion charakteryzowała się wysoką wilgotnością. Nasiona wysiano na przełomie marca i kwietnia 2004 r. w ilości $6,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Azotem nawożono przed zwarciem rzędów i zabieg powtórzono po dwóch miesiącach wzrostu. Plon zebrano w połowie października i zmagazynowano w chłodni o temperaturze powietrza wynoszącej $3^{\circ}\text{C}\pm 0,5$.

Jako trzecie warzywo wykorzystano seler korzeniowy odmiany *Jablkowy*. Przed rozpoczęciem uprawy glebę nawożono superfosfatem potrójnym, saletrą amonową i fosforanem amonu. Rzosady posadzono w połowie maja 2004 r. na glebie po oborniku w ilości $30 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, przyorany jesienią na głębokość 18 cm. Odczyn gleby wynosił $\text{pH} = 6,5$. Chwasty zwalczano mechanicznie przed i w trakcie uprawy. Plon zebrano w połowie października i zmagazynowano w chłodni o temperaturze powietrza wynoszącej $3^{\circ}\text{C}\pm 0,5$.

Warzywa przechowywano w chłodniach producenta nie dłużej niż 3 dni. Transport do laboratorium zajmował około 1,5 godziny i surowiec ponownie umieszczano w lodówkach. Suszenie następowało w ciągu jednego tygodnia od dnia dostarczenia materiału do laboratorium. W takich warunkach ubytki wilgotności surowców poddawanych dalszym zabiegom nie przekraczały 2%, co pozwoliło założyć, że materiał wyjściowy był jednorodny pod względem wilgotności. Dokonywano wstępnej selekcji warzyw w celu wyeliminowania egzemplarzy nadpsutych, niewykształconych oraz uszkodzonych przy zbiorze lub w transporcie. Wszystkie próbki przygotowano w formie walców o średnicy 20 mm i wysokości 5 mm. Do przygotowania próbek użyto krawalnicy firmy ZELMER TYP 493, za pomocą której z korzeni wycinano plastry o grubości $5 \pm 0,2$ mm. Następnie z plastrów, centralnie wzdłuż osi pionowej, wykrawano walce o średnicy $20 \pm 0,2$ mm, wykorzystując wycinarkę własnej konstrukcji. Średnica korzeni marchwi i pietruszki, z których wycinano plastry, wynosiła od 25 do 35 mm, co powodowało, że każda próbka zawierała zarówno część rdzeniową, jak i korową.

Warzywa przygotowane w formie walców dzielono na trzy części. Pierwszą część poddawano badaniom cech mechanicznych i reologicznych w celu ustalenia właściwości surowców. Wyznaczono wilgotność każdego z surowców. Drugą część materiału przeznaczono do suszenia zaproponowanymi metodami bez stosowania zabiegów wstępnych. Trzecią część surowców poddano przed suszeniem blanszowaniu lub odwadnianiu osmotycznemu.

4.2. Zabiegi wstępne

Blanszowanie oraz odwadnianie osmotyczne przyjęto jako warianty zabiegów wstępnych, ze względu na ich szerokie wykorzystywanie w przemyśle spożywczym. Ponadto, wysoka temperatura wody podczas blanszowania oraz wnikiwanie substancji osmotycznej do wnętrza struktury tkankowej podczas odwadniania osmotycznego sprzyjają zmianom strukturalnym w obrębie ścian komórkowych, które powinny wpływać na zmienność cech mechanicznych i reologicznych produktów. Warunki prowadzenia zabiegów ustalono w oparciu o literaturę, przyjmując parametry najkorzystniejsze dla badanych surowców. W celach porównawczych wykonano cały zakres badań również dla surowców niepoddanych zabiegom wstępnym.

4.2.1. Blanszowanie

Blanszowanie (BO) wykonano w wodzie o temperaturze $95 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 3 minuty. W kolejnych powtórzeniach zabiegu utrzymywano stały stosunek masy wody do masy warzyw wynoszący 40:1, według wskazań literaturowych [Maharaj i Sankat 1996]. Po zabiegu materiał chłodzono w zimnej wodzie przez 1 minutę, następnie umieszczano na sitach w celu ocieknięcia, a w ostatniej fazie osuszano na bibule. Bezpośrednio po osuszeniu część próbek umieszczano w suszarce laboratoryjnej KC 100/200 w celu wyznaczenia ubytków suchej substancji, resztę materiału przeznaczano do suszenia. W trakcie blanszowania wystąpiły straty suchej masy wynoszące odpowiednio: 17% dla marchwi,

8,5% dla pietruszki i 14% dla selera. Uzyskane wyniki są zbieżne z rezultatami otrzymanymi przez Domagałę [1995] oraz Domagałę i Janusa [1993].

4.2.2. Odwadnianie osmotyczne

Ze względu na łatwy dostęp do substancji osmoaktywnej i niski koszt zabiegu odwadnianie osmotyczne (OS) wykonano w 5% roztworze NaCl. Aby uzyskać wyższy stopień odwodnienia, należy stosować wyższe stężenia roztworów soli (10–35%) [Chua i in. 2004, Topping i in. 2001]. Mając jednak na uwadze fakt, że odwadnianiu poddawano produkty spożywcze, a w trakcie zabiegu chlorek sodu wnika do wnętrza odwadnianego materiału, zdecydowano o zastosowaniu niskiego, 5% stężenia roztworu NaCl. W celu zwiększenia stopnia odwodnienia czas trwania procesu wydłużono do 24 godzin. Uzyskano następujące ubytki wilgotności: z 88 do 79% dla marchwi, z 84 do 74% dla pietruszki i z 90 do 82% dla selera. Stosunek masy roztworu osmotycznego do masy surowca wynosił 4:1, tak jak proponują inni badacze [Lewicki i in. 2002, Pereira i in. 2007, Kowalska i Lenart 2005]. Temperatura roztworu osmotycznego wynosiła $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Po zabiegu materiał umieszczano na sitach w celu ocieknięcia, następnie osuszano na bibule i przeznaczano do suszenia.

4.3. Suszenie warzyw

Surowce warzywne suszono trzema metodami: konwekcyjnie oraz sublimacyjnie i mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia. Metoda sublimacyjna i mikrofalowa pod obniżonym ciśnieniem są nowoczesnymi technikami odwadniania o dobrze poznanych podstawach teoretycznych, z którymi związane są duże nadzieje na pozyskiwanie produktów o wysokiej jakości. Metoda konwekcyjna jest ciągle najpowszechniej wykorzystywana w przemyśle spożywczym i jednocześnie uważana za zabieg bardzo destrukcyjny. Została zastosowana jako metoda porównawcza w odniesieniu do nowoczesnych technik suszarniczych. Parametry prowadzenia poszczególnych procesów przyjęto w oparciu o literaturę tak, aby wykluczyć suszenie w warunkach skrajnych. W trakcie suszenia konwekcyjnego i sublimacyjnego próbki układano ściśle na sitach w pojedynczej warstwie, co dało obciążenia przedstawione w tabeli 1. Podczas suszenia mikrofalowego w warunkach obniżonego ciśnienia w zbiorniku umieszczano porcje surowca o stałej masie wynoszącej po 60 g. W trakcie blanszowania oraz odwadniania osmotycznego wystąpiły ubytki składników suchej substancji, co znalazło swoje potwierdzenie w obciążeniu sit. Najmniejsze ubytki wystąpiły dla pietruszki, większe dla marchwi, a zdecydowanie największe dla selera. Spośród badanych surowców największe obciążenie sita miało miejsce w przypadku marchwi, a najmniejsze dla selera.

W tabeli 2 umieszczono dane dotyczące zawartości suchej substancji w materiałach suszonych uzyskanych przy różnych wersjach doświadczeń. Charakterystykę suszy ograniczono do zawartości suchej substancji, ponieważ uznano, że jest to wskaźnik decydujący o cechach mechanicznych i reologicznych produktów.

Tabela 1
Table 1

Obciążenie sit podczas suszenia warzyw
Sieves load during vegetables drying

	Obciążenie sit – Sieves load [kg·m ⁻²]		
	brak obróbki wstępnej without pretreatment	blanszowanie blanching	odwadnianie osmotyczne osmotic dehydration
Marchew – Carrot	2,52±0,06	2,35±0,05	2,28±0,03
Pietruszka – Parsley	2,38±0,04	2,36±0,04	2,26±0,03
Seler – Celery	2,18±0,04	2,09±0,02	1,84±0,03

Tabela 2
Table 2

Zawartości suchej substancji w suszach
Dry substance content

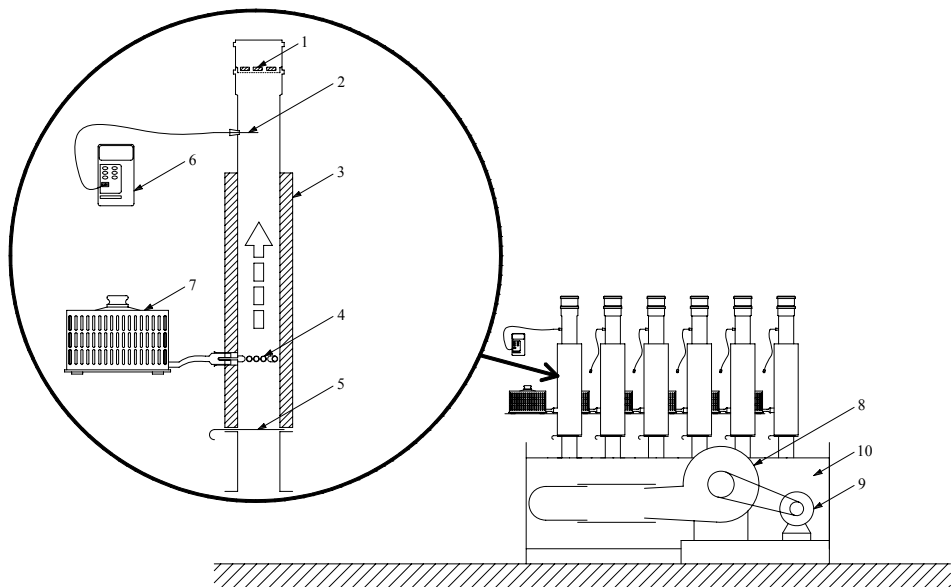
	Zawartości suchej substancji – Dry substance content [%]		
	suszenie konwekcyjne convective drying	suszenie sublimacyjne freeze-drying	suszenie mikrofalowe vacuum-microwave drying
Marchew – Carrot	92,5±0,7	94,4±0,5	97,1±1,1
Pietruszka – Parsley	91,1±0,5	93,8±0,4	95,3±0,8
Seler – Celery	89,8±0,4	93,1±0,4	95,7±0,7

Najniższe wilgotności suszy uzyskano podczas suszenia mikrofalowego w warunkach obniżonego ciśnienia (3–5%), nieco wyższe podczas suszenia sublimacyjnego (5–7%), a najwyższe przy suszeniu konwekcyjnym (8–10%). Jedynie seler suszony konwekcyjnie charakteryzował się wilgotnością nieco przekraczającą 10%.

4.3.1. Metoda konwekcyjna

Badania eksperymentalne suszenia konwekcyjnego (SK) marchwi, pietruszki i selera wykonano w prototypowej instalacji laboratoryjnej przedstawionej na rysunku 5, szerzej opisanej w pracy Janowicza [1999].

Silnik elektryczny (9) o mocy znamionowej wynoszącej 0,55 kW i prędkości obrotowej 1375 obr·min⁻¹ napędza wentylator promieniowy (8) o wydatku 700 m³·h⁻¹. Powietrze tłoczone jest poprzez zbiornik wyrównawczy (10) do kanałów doprowadzających (3) czynnik suszący do odwadnianego materiału. Surowiec poddawany suszeniu umieszczano na sicie kosza (1) znajdującego się w górnej części każdego z kanałów. Temperaturę czynnika suszącego regulowano poprzez zmianę mocy grzałek (4) sterowanych opornicą napięciową (7). Maksymalna moc każdej z grzałek wynosiła 2 kW. Temperaturę powietrza wewnątrz kanału doprowadzającego kontrolowano za pomocą miernika YF-160 (6) z zestawem termopar (2). Dokładność pomiaru temperatury wynosiła ±0,1°C. Prędkość przepływu czynnika suszącego regulowano zasuwą (5).

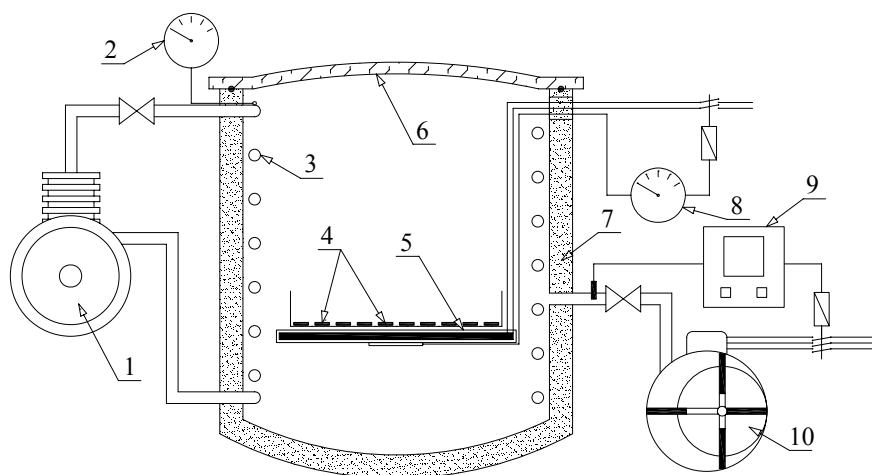


Rys. 5. Schemat instalacji do suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej
 Fig. 5. Convective drier scheme

Surowiec układano na sitach w pojedynczej warstwie, a czynnik suszący przepływał prostopadłe do warstwy materiału. W oparciu o analizę literatury temperaturę czynnika suszącego ustalono na poziomie 50°C [Andrea i in. 2004, Kaya i in. 2007, Lewicki i Jakubczyk 2004, Markowski 1997, Tan i in. 2001, Witrowa-Rajchert 2003], a prędkość przepływu 1,5 m·s⁻¹ [Doymaz i in. 2006, Sacilik i Unal 2005]. Wilgotność względna powietrza znajdującego się w pomieszczeniu z instalacją suszarniczą i pobieranego do suszenia wynosiła 50–60% przy temperaturze 21–23°C. W trakcie trwania procesu kontrolowano masę próbek za pomocą wagi elektronicznej WPE-300 z dokładnością ±0,1g. Po zakończeniu odwadniania metodą konwekcyjną próbki dzielono na cztery równe części i pakowano próżniowo przy użyciu pakowarki Tepro, typ PP-5.4 w folie o strukturze PET/ALU/PE. Podstawowe właściwości folii są następujące: grubość – 80 μm, gramatura – 77,9 g·m⁻², przepuszczalność dla O₂<50 cm³·(m²·24h)⁻¹, przepuszczalność dla N₂<10 cm³·(m²·24h)⁻¹, przepuszczalność dla CO₂<150 cm³·(m²·24h)⁻¹, wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż – 200–300% w temperaturze 23°C, wytrzymałość na rozciąganie w poprzek – 250–400% w temperaturze 23°C, tolerancja grubości folii ±10%. Folia użyta do przechowywania suszy posiada świadectwo zgodności z normami żywieniowymi. Zapakowane susze przechowywano w temperaturze pokojowej bez dostępu światła. Każdą z czterech porcji przeznaczono do badań wytrzymałościowych wykonywanych bezpośrednio po suszeniu oraz po 6, 12 i 18 miesiącach przechowywania.

4.3.2. Metoda sublimacyjna

Suszenie sublimacyjne (SS) wykonano w instalacji doświadczalnej typu OE-950, której schemat przedstawiono na rysunku 6. Tackę z próbkami (4) umieszczano na płycie grzejnej (5) w komorze suszenia (7) zamkniętej od góry pokrywą (6). Głównym elementem układu jest dwustopniowa pompa rotacyjna (10) o wydajności $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ przy ciśnieniu 10^{-3} Pa . Do pomiaru ciśnienia w komorze suszenia wykorzystano próżniomierz (9) typu MP-211. Instalację wyposażono w agregat chłodniczy (1) oraz wskaźniki: temperatury kondensatorów (2) i temperatury płyty grzejnej (8). Szczegóły budowy i działania instalacji opisano w pracach Kramkowskiego i in. [2002b, 2003b].



Rys. 6. Instalacja doświadczalna do suszenia sublimacyjnego

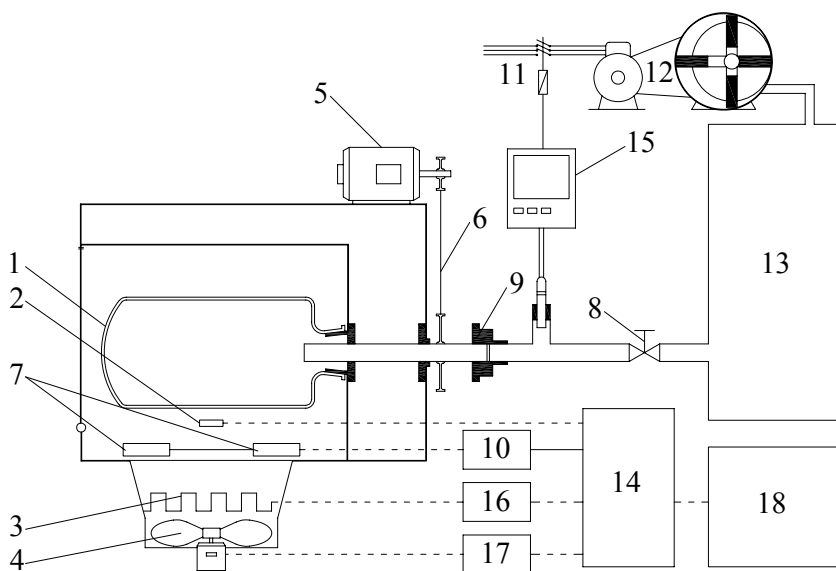
Fig. 6. Freeze drier scheme

Surowce zamrażano na zewnątrz instalacji, aby wykluczyć niepożądany efekt samozamrażania. Wówczas, w sposób konwekcyjny, z surowca usuwane jest około 8% zawartej w nim wody, co powoduje skurcz suszarniczy. Próbkę zamrażano w temperaturze -20°C z szybkością $1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. Po wyjęciu z zamrażarki materiał umieszczano w komorze instalacji, w której obniżano ciśnienie do wartości roboczej wynoszącej 100 Pa. Z doniesień literaturowych wynika, że wysokie temperatury płyty grzejnej oraz zastosowanie kontaktowego sposobu dostarczania ciepła przyspieszają proces, ale jednocześnie pogarszają jakość suszy w stosunku do niskich temperatur procesu i radiacyjnego sposobu dostarczania ciepła [Kramkowski i in. 2003a, 2002a, Stępień i in. 2003]. Badania wykonano, stosując rozwiązanie kompromisowe, polegające na wykorzystaniu kontaktowego sposobu dostarczania ciepła przy stosunkowo niskiej temperaturze płyty grzejnej wynoszącej 20°C . Podobnie jak w przypadku produktów otrzymanych metodą konwekcyjną susze dzielono na cztery części i na czas przechowywania pakowano próżniowo.

4.3.3. Metoda mikrofalowa w warunkach obniżonego ciśnienia

Do suszenia mikrofalowego w warunkach obniżonego ciśnienia (SMP) wykorzystano instalację laboratoryjną SM 200, której schemat przedstawia rysunek 7, a budowę i działanie szerzej opisano w pracach Szarycza [2001] oraz Kramkowskiego i in. [2003c]. **W dalszej części niniejszej rozprawy metoda ta będzie nazywana w skrócie metodą mikrofalową.**

We wnęce mikrofalowej, przez którą przepływa powietrze, umieszczono walcowy zbiornik (1) wykonany ze szkła o niskim współczynniku strat dielektrycznych. Pole elektromagnetyczne we wnęce jest wytwarzane przez dwa magnetrony (7) o łącznej mocy 1200 W. W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania próbek zastosowano obrót bębna w czasie trwania procesu dzięki zamontowaniu silnika (5) z przekładnią (6). Para wodna gromadząca się w trakcie odwadniania materiału jest odprowadzana do zbiornika wyrównawczego kanałem przebiegającym w osi wału i głowicy. Ciśnienie wewnątrz aparatury regulowano poprzez układ wyposażony w miernik podciśnienia (15) połączony z układem sterującym (11) pracą pompy próżniowej (12).



Rys. 7. Schemat suszarki mikrofalowo podciśnieniowej SM 200
Fig. 7. Vacuum microwave drier SM 200 scheme

W czasie suszenia moc mikrofal była stała i wynosiła 480 W. Podciśnienie zmieniło się w zakresie od 10 do 4 kPa. Wartości te przyjęto na podstawie badań wstępnych pozwalających określić warunki, w których minimalizowano występowanie efektu „puffingu”, co znacznie ograniczałoby możliwość wykorzystania próbek do założonych

badania. Początkowe podciśnienie wewnątrz bębna wynosiło 10 kPa, a kiedy osiągało wartość 4 kPa, włączała się pompa i usuwała nagromadzoną parę wodną w zbiorniku.

Podciśnienie w bębnie uzyskiwano dzięki instalacji składającej się z pompy próżniowej, układu kompensacyjnego (13) i zaworu (8). Obrót bębna umożliwiało zainstalowanie złącza (9). Ponadto w instalacji zamontowano termoparę (2) mierzącą temperaturę powietrza wpływającego do komory dzięki pracy wentylatora (4) i ogrzewanego grzałką (3). Układ sterujący temperaturą (14), kontrolowany komputerem (18), obejmował sterowanie mocą mikrofal (10), sterowanie strumieniem ciepła (16) i sterowanie wentylatorem (17). Po odwodnieniu i rozważeniu suszu na cztery części zapakowane próżniowo próbki przechowywano do czasu badań wytrzymałościowych.

4.4. Badania wytrzymałościowe

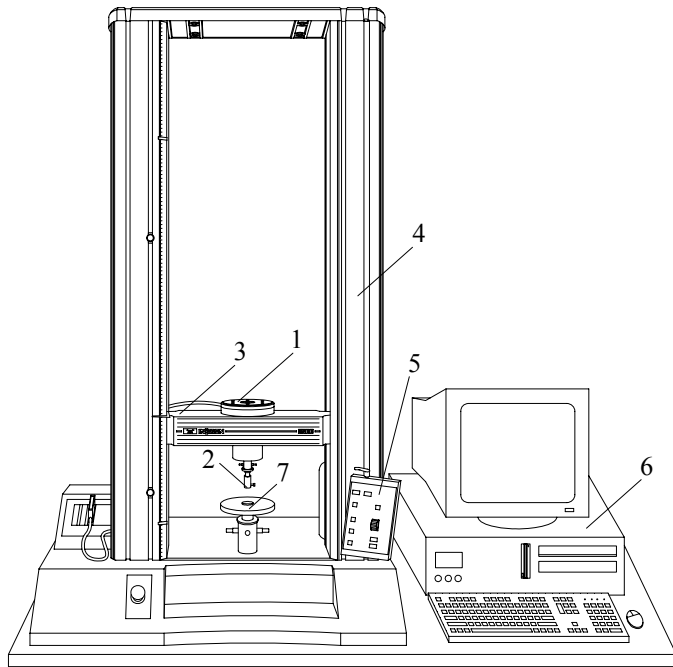
4.4.1. Testy ściskania

Badania cech mechanicznych i reologicznych wykonano w maszynie wytrzymałościowej Instron 5566 wyposażonej w trzy wymienne głowice klasy 0,5 (rys. 8). Maksymalne obciążenie ramy (4) urządzenia wynosiło 10 kN. Każda z głowic (1), montowana na ruchomym ramieniu (3), obejmowała zakresem inny przedział obciążeń: do 100 N, do 1 kN i do 10 kN. W dolnej części głowicy montowano przystawkę (2) do określonego typu badań. Próbki układano na stoliku (7). Panel sterujący (5) służy do manipulowania położeniem głowicy w trakcie manewrów przygotowawczych, uruchamiania i zakończenia testu. Komunikacja z maszyną wytrzymałościową, polegająca na programowaniu przebiegu testów oraz gromadzeniu danych, odbywa się za pomocą komputera (6).

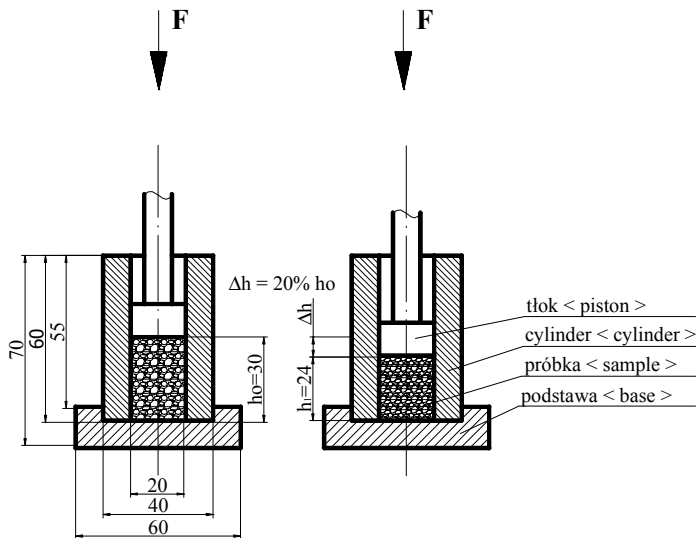
Wytrzymałość na ściskanie wyznaczano dla próbek umieszczonych w cylindrze i ściskanych tłokiem, jak zaproponowali Jakubczyk i Lewicki [2002]. Do tego celu zaprojektowano i wykonano odpowiednią przystawkę opisywaną w publikacjach [Stępień 2005 i 2006] i przedstawioną na rysunku 9.

Średnica tłoka była mniejsza od średnicy cylindra o 0,2 mm, co powodowało, że przesuwanie tłoka nie towarzyszyło tarcie. Każdorazowo ściskano taką liczbę plastrów, aby utworzona warstwa miała wysokość równą 30 mm. Proces ściskania trwał do momentu odkształcenia warstwy o 20% jej wysokości początkowej.

Prędkość przemieszczania tłoka podczas ściskania wynosiła $1,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, co jest zgodne z zaleceniami ASAE [1986] w badaniach uznawanych za prowadzone w warunkach quasi-statycznych. Wykonano po 5 powtórzeń pomiarów odporności na ściskanie.



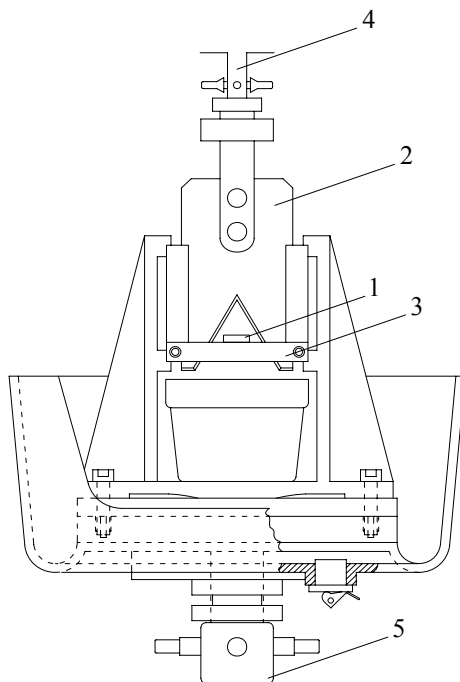
Rys. 8. Maszyna wytrzymałościowa Instron 5566
 Fig. 8. Testing machine Instron 5566



Rys. 9. Przystawka do ściskania materiałów biologicznych
 Fig. 9. Compression test unit for biological materials

4.4.2. Testy przecinania

Do badań wytrzymałości na przecinanie zastosowano zmodyfikowaną przystawkę firmy Instron o kątach ostrza i rozwarcia noża wynoszących po 60° (rys. 10).



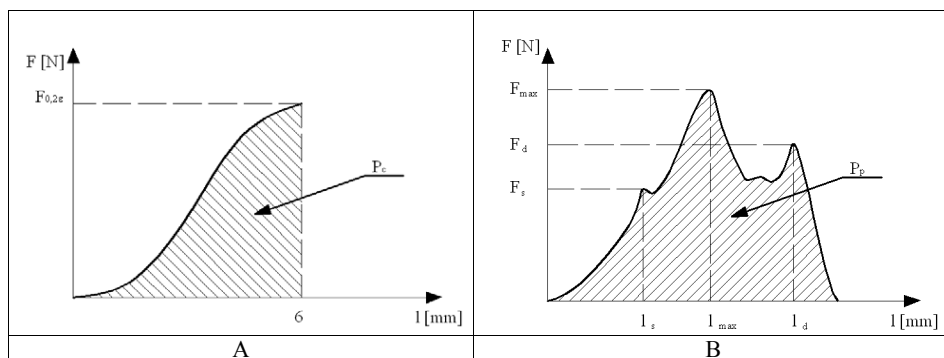
Rys. 10. Przystawka do przecinania materiałów biologicznych
Fig. 10. Cutting test unit for biological materials

Przecinano pojedyncze próbki (plastry). Prędkość noża wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, co było minimalną wartością pozwalającą na całkowite przecięcie próbek. Spód przystawki mocowano w uchwycie maszyny wytrzymałościowej (5), natomiast nóż (2), poprzez odpowiednią obejmę (4), mocowano do głowicy pomiarowej. Próbkę (1) układano na stoliku (3) będącym jednocześnie przeciwostrem. Wykonano po 10 powtórzeń pomiarów wytrzymałości na przecinanie.

4.4.3. Obliczanie wartości pracy ściskania i pracy przecinania

Umownie przyjmuje się, że w odniesieniu do materiałów biologicznych praca ściskania P_c i praca przecinania P_p wyrażona jest polem pod krzywą siła-odkształcenie (rys. 11). Wartości pracy można obliczyć poprzez całkowanie formuły matematycznej opisującej przebieg danej próby w granicach odkształcenia ściskanej próbki lub w granicach przemieszczenia noża tnącego. Jednakże w trakcie ściskania, a szczególnie w trakcie

przecinania suszy, dochodzi do pęknięć materiału powodujących nagłe zmiany wartości rejestrowanych sił. Opis za pomocą formuł matematycznych nie pozwala uwzględnić gwałtownych zmian przebiegów funkcji, co prowadzi do uzyskania wyników obarczo-nych dużym błędem. Wykorzystano więc „metodę trapezów”, która polega na obliczaniu pól powierzchni trapezów elementarnych i sumowaniu ich wartości. Dokładność obli- czeń zależy wówczas jedynie od właściwego doboru częstości próbkowania.



Rys. 11. Sposób obliczania wartości pracy ściskania – A i wartości pracy przecinania – B
 Fig. 11. Calculation method of the deformation –A and the cutting work value – B

Wartości pracy ściskania przeliczono na 1 g materiału jedynie dla suszy. Dla produktu po ponownym uwodnieniu podano wartości pracy całkowitej ściskania. Wartości pracy przecinania przeliczono na 1 cm² przecinanej powierzchni zarówno dla suszy, jak i materiałów ponownie uwodnionych.

4.5. Badania relaksacji naprężeń

Testy relaksacji naprężeń wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566 z wykorzystaniem przystawki do prób ściskania materiałów biologicznych. W oparciu o badania wytrzymałościowe wyznaczono średnią wartość naprężenia po odkształceniu materiału o 20% jego wysokości początkowej. Był to poziom naprężenia, od którego rozpoczynano rejestrację przebiegu procesu relaksacji. W celu zminimalizowania wpływu relaksacji, przebiegającej również w trakcie obciążania próbki do założonego poziomu, pierwszą fazę procesu wykonano z prędkością znacznie wyższą niż w testach ściskania, wynoszącą 10 mm·min⁻¹. Zmiany naprężeń w materiale rejestrowano co 15 sekund trwania procesu. Wykonano po 5 powtórzeń pomiaru przebiegu procesu.

Testy relaksacji naprężeń, szeroko stosowane do wyznaczania właściwości lepko- -sprężystych produktów rolniczych, najczęściej są aproksymowane równaniem wykład- niczym, będącym rozwiązaniem modelu Maxwella:

$$F(\tau) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{-B_i \cdot \tau} \quad (4.5.1)$$

gdzie: $F(\tau)$ – siła relaksacji po czasie τ , [N],
 A_i, B_i – stałe równania wykładniczego.

Ze względu na brak liniowości zależności siła – odkształcenie występującej podczas obciążania owoców i warzyw zwiększa się często liczbę składników równania (4.5.1), aby poprawić dokładność aproksymacji. Dokładne odwzorowanie danych eksperymentalnych najczęściej wymaga zastosowania w równaniu od 4 do 6 stałych zmieniających się w sposób niezależny. W takim przypadku porównanie krzywych relaksacji naprężeń staje się utrudnione. Z taką sytuacją mamy do czynienia w badaniach będących przedmiotem niniejszej rozprawy. Matematyczny opis określonych zjawisk powinien zawierać minimalną liczbę stałych o znanej interpretacji fizycznej. Procedurę pozwalającą polepszyć dotychczas stosowane metody opisu zjawiska relaksacji naprężeń przedstawili Stropek i Gołacki [2006]. Należy dokonać normalizacji krzywych relaksacji naprężeń poprzez wprowadzenie następującego współczynnika [Peleg 1980]:

$$Y(\tau) = \frac{F_0 - F(\tau)}{F_0} \quad (4.5.2)$$

gdzie: $Y(\tau)$ – znormalizowana funkcja relaksacji naprężeń [-],
 F_0 – początkowa siła relaksacji, [N],
 $F(\tau)$ – siła relaksacji po czasie τ , [N].

Zmiany funkcji $Y(\tau)$ w trakcie testu umożliwiają obserwację przebiegu zaniku zarówno siły, jak i naprężenia, ponieważ z definicji relaksacji naprężeń wynika konieczność utrzymywania stałej wartości odkształcenia, co pozwala pominąć zmiany pola przekroju poprzecznego próbki. Ważna jest również bezwymiarowość współczynnika, co uniezależnia jego wartość od całkowitego poziomu naprężenia. Przebieg zmian znormalizowanej funkcji relaksacji $Y(\tau)$ w czasie testu można opisać następującym równaniem [Mickley i in. 1957]:

$$Y(\tau) = \frac{a \cdot b \cdot \tau}{1 + b \cdot \tau} \quad (4.5.3)$$

Stałe a i b mają precyzyjną interpretację fizyczną. Wartość a określa poziom, do którego zanikają naprężenia podczas relaksacji. Dla $a = 0$ relaksacja naprężeń nie występuje, co oznacza, że mamy do czynienia z ciałem idealnie sprężystym. Dla ciał rzeczywistych $0 < a < 1$ – jednocześnie występują asymptotyczne wartości $Y(\tau)$ przy $\tau \rightarrow \infty$. Im wartość stałej a jest bliższa zeru, tym ciało charakteryzuje się większą sprężystością.

Stała b informuje o prędkości zaniku naprężeń w trakcie testu. Jej odwrotność oznacza czas konieczny do osiągnięcia naprężenia o wartości $a/2$. Jeśli $b = 0$, relaksacja naprężeń nie występuje, ponieważ spadek naprężenia w trakcie testu do poziomu $a/2$ wymaga nieskończenie długiego czasu. Mamy wówczas do czynienia z ciałem idealnie sprężystym. Dla ciał lepko-sprężystych wyższa wartość b oznacza szybszy spadek naprężeń w trakcie testu, co jest miarą intensywności zmian o charakterze nieodwracalnym występujących w strukturze wewnętrznej materiału.

4.6. Badania rehydracji suszy

Badania wytrzymałościowe oraz testy relaksacji naprężeń wykonano dla suszy oraz dla materiałów uwodnionych. Rehydrację wykonano w wodzie destylowanej o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$. W zlewkach umieszczano po 5 plastrów suszy o znanej masie i zalewano 100 cm^3 wody destylowanej. Przebieg procesu uwadniania badano w zakresie 0–5 godzin. Po upływie odpowiednio 0,5; 1; 2; 3; 4 i 5 godzin trwania rehydracji próbki oddzielano na sicie od wody, osuszano bibułą i ważono za pomocą wagi elektronicznej WPE-300 z dokładnością $\pm 0,1\text{g}$ [Witrowa-Rajchert 1999]. Pięciogodzinny czas uwadniania pozwalał uzyskać materiał o wilgotności zbliżonej do wilgotności surowca, co było pożądane ze względu na konieczność odnoszenia cech mechanicznych i reologicznych materiałów uwodnionych do cech surowca.

W przypadku braku destrukcyjnego oddziaływania procesu odwadniania na strukturę tkankową warzyw, po ponownym uwodnieniu materiał powinien osiągnąć masę taką, jaką miał przed suszeniem. Względny przyrost masy próbki obliczono, odnosząc przyrost masy próbki w trakcie rehydracji (m_τ) do masy początkowej suszy (m_0). Zależność opisano równaniem postaci [Witrowa-Rajchert 1999]:

$$m_\tau \cdot m_0^{-1} = a + b \cdot [1 - 1 \cdot (1 + b \cdot c \cdot \tau)^{-1}] \quad (4.6.1)$$

gdzie: m_τ – masa próbki po czasie τ rehydracji, [g],
 m_0 – masa początkowa próbki, [g],
 a, b, c – stałe,
 τ – czas trwania rehydracji, [s].

Niekorzystne zmiany w strukturze komórkowej suszonych warzyw powodują istotne obniżenie zdolności wchłaniania i utrzymywania wody w tkance roślinnej. Stopień zmian decyduje o ilości wody, która może być wchłonięta w trakcie rehydracji. Masa wody wchłanianej przez susz w trakcie uwadniania odniesiona do masy wody w surowcu pozwala obliczyć wartości względnego przyrostu masy wody. Zależność opisano równaniem 4.6.1.

Skład chemiczny i struktura tkanek decydują o wielkości ubytków rozpuszczalnych składników suchej substancji ponownie uwadnianych suszy. Zmiany względnej

zawartości suchej substancji w czasie rehydracji obliczono jako iloraz suchej masy próbki po określonym czasie uwadniania (m_{st}) do suchej masy próbki przed rehydracją (m_{s0}). Za Witrową-Rajchert [1999] zależność opisano równaniem:

$$m_{st} \cdot m_{s0}^{-1} = a + [b \cdot (1 + b \cdot c \cdot \tau)^{-1}] \quad (4.6.2)$$

gdzie: m_{st} – masa suchej substancji po czasie τ rehydracji, [g],
 m_{s0} – masa suchej substancji przed rehydracją, [g],
 a, b, c – stałe,
 τ – czas trwania rehydracji, [s].

Na podstawie równań 4.6.1 i 4.6.2 obliczono wartości równowagowe poszczególnych wskaźników. Dopasowanie równań do danych eksperymentalnych oceniono w oparciu o błędy standardowe estymacji i współczynniki determinacji.

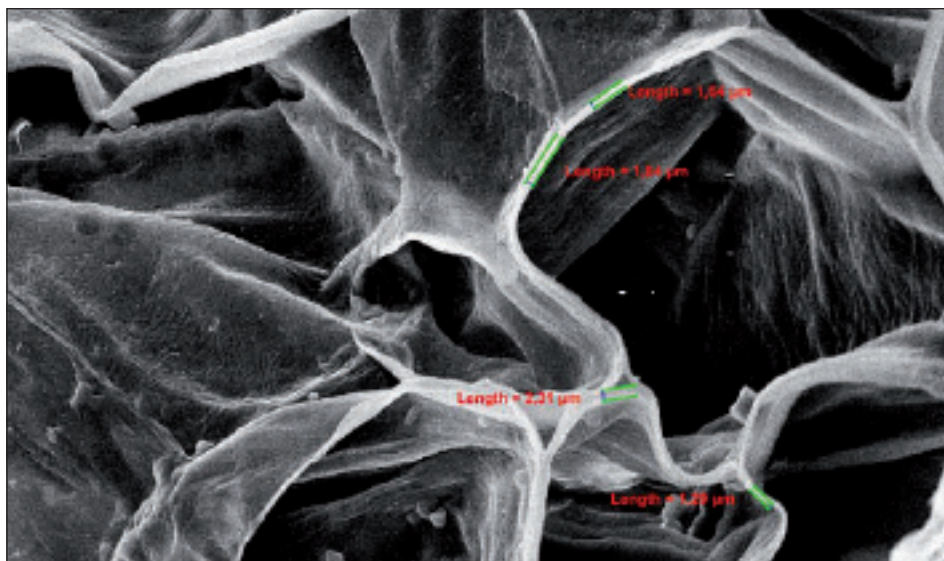
4.7. Badania struktury wewnętrznej

Obserwacje prowadzono pod mikroskopem skaningowym firmy „Opton” typ LEO 435 VP. Próbki przygotowano w sposób następujący: patron wraz z przyklejonym wycinkiem tkanki roślinnej zamrażano w ciekłym azocie, wykorzystując aparat do mrożenia „Cryo”. Zmrożoną tkankę umieszczano w kolumnie mikroskopu skaningowego, wcześniej schłodzonej do temperatury -150°C . Preparat poddawano sublimacji, a następnie napyłano złotem. Uzyskane obrazy, będące 700-krotnym powiększeniem struktury, zachowywano w formie plików elektronicznych do dalszej analizy. W niniejszej pracy analizę zdjęć mikroskopowych warzyw surowych oraz przetworzonych wykonano przy użyciu specjalistycznego oprogramowania komputerowego przygotowanego na potrzeby niniejszych badań.

Ze względu na specyfikę badanych obiektów wytypowano trzy wskaźniki charakteryzujące strukturę komórkową: *grubość* ścian komórkowych (g), *wydłużenie* komórki (w) oraz *kolistość* komórki (k).

Podjęto próbę pomiaru *grubości* ścian komórek warzyw poddanych obróbce, co zaprezentowano na fotografii 1.

Komórki surowców badanych warzyw mają regularny kształt, zbliżony do okręgu. Zabiegi stosowane podczas przetwarzania powodują nieodwracalne zmiany w strukturze wewnętrznej, widoczne jako rozciągnięcie i spłaszczenie komórek. Wyznacznikiem tych zmian może być wskaźnik nazwany *wydłużeniem*, którego wartość obliczano jako stosunek najkrótszego wymiaru komórki do wymiaru najdłuższego. Dla okręgu *wydłużenie* przyjmuje wartość 1. W pozostałych przypadkach $0 < w \leq 1$. Im niższa wartość *wydłużenia*, tym komórki są bardziej spłaszczone, co świadczy o intensywności nieodwracalnych zmian w obrębie struktury wewnętrznej warzyw poddanych obróbce.



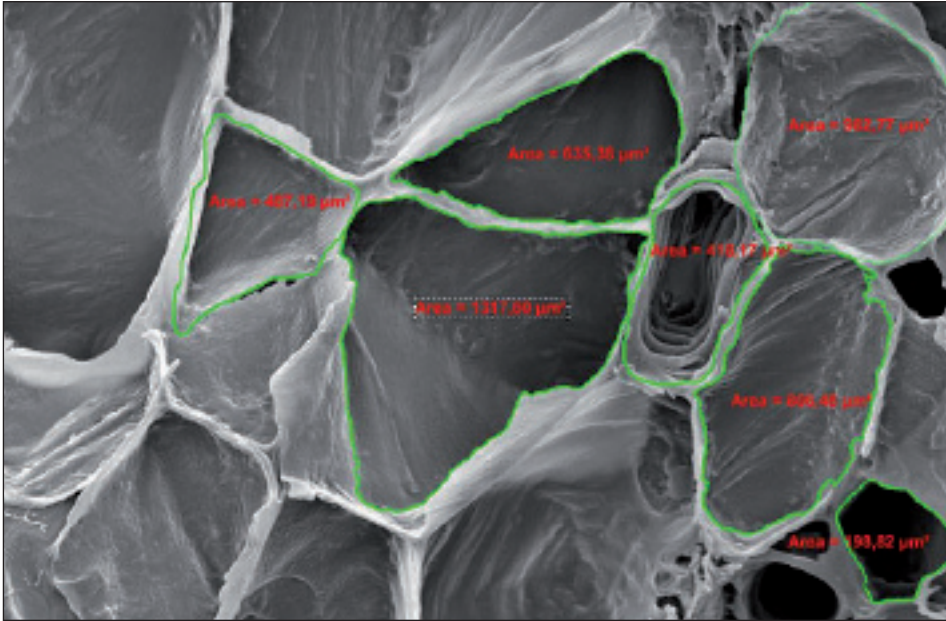
Fot. 1. Pomiar grubości ściany komórkowej
 Phot. 1. Thickness measurement of cell wall

Oprócz zmiany kształtu naprężenia wewnętrzne występujące w komórkach roślinnych poddanych oddziaływaniu różnego typu czynników zewnętrznych powodują odkształcanie ścian komórkowych widoczne na zdjęciach mikroskopowych jako liczne pofałdowania. Miarą tego typu zmian może być wskaźnik nazwany *kolistością*, którego wartość jest stosunkiem średnicy okręgu o polu powierzchni równym polu badanej komórki do średnicy okręgu o obwodzie równym obwodowi badanej komórki. Jeżeli we wzorze na *kolistość* zastosuje się długości średnic podniesione do potęgi drugiej, wówczas łatwiejsze jest określenie różnic pomiędzy obiektami, których ściany charakteryzują się niewielkim pofałdowaniem [Pluta 1982]. Stąd:

$$k = \frac{d_p^2}{d_o^2} \quad (4.7.2)$$

gdzie: d_p – średnica okręgu o polu powierzchni równym polu powierzchni komórki, m,
 d_o – średnica okręgu o obwodzie równym obwodowi komórki, m.

Obliczanie wartości wskaźnika możliwe jest zatem wtedy, gdy znane jest pole powierzchni i obwód komórki. Sposób wyznaczenia tych parametrów pokazano na przykładowej fotografii 2.



Fot. 2. Pomiar pola powierzchni i obwodu komórki roślinnej
 Phot. 2. Plant cell face area and circumference measurements

W praktyce do obliczeń wartości *kolistości* komórek zastosowano wzór wyprowadzony w sposób następujący:

$$P = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \Rightarrow d_p^2 = \frac{4 \cdot P}{\pi} \quad (4.7.3)$$

$$O = \pi \cdot d_o \Rightarrow d_o^2 = \frac{O^2}{\pi^2} \quad (4.7.4)$$

stąd:

$$k = \frac{d_p^2}{d_o^2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot P}{O^2} \quad (4.7.5)$$

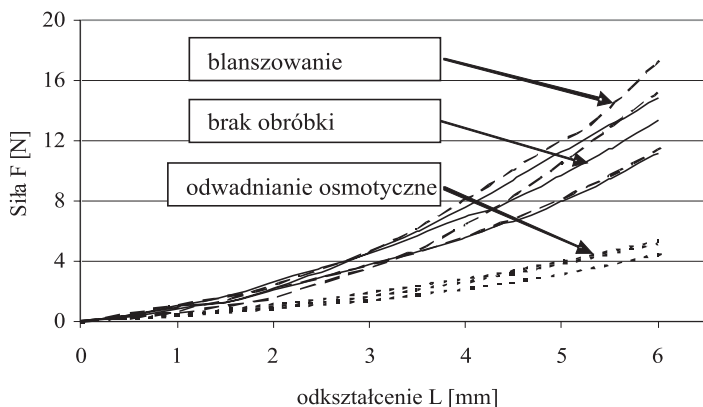
gdzie: P – pole powierzchni komórki, [m²],
 O – obwód komórki, [m].

Niższa wartość wskaźnika świadczy o większym stopniu degradacji komórek badanych warzyw. Dla komórek o kształcie okręgu, bez żadnych zmian w obrębie ścian, wartość *kolistości* wynosi 1. W pozostałych przypadkach $0 < k \leq 1$.

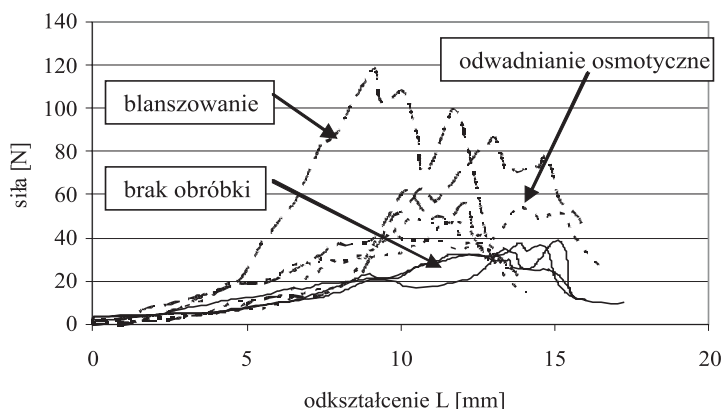
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Cechy wytrzymałościowe warzyw poddanych suszeniu różnymi metodami wyznaczono w oparciu o testy ściskania i testy przecinania. Przyjęto, że ze względu na brak jednorodności materiałów biologicznych wyróżnikiem odporności na ściskanie i przecinanie będą wartości pracy ściskania i pracy przecinania. Praca jako wielkość fizyczna łączy w sobie dwa parametry: siłę i przemieszczenie. Osobna analiza każdego z nich nie jest celowa, z uwagi na dużą zmienność danych eksperymentalnych, co uniemożliwia przeprowadzenie wielokierunkowej analizy wariancji. Ponadto uznano za celowe przeliczanie wartości pracy ściskania suszy na jeden gram materiału, ponieważ w celu uzyskania stałej wysokości początkowej próbki należało tworzyć warstwy, które w zależności od metody suszenia i obróbki wstępnej składały się z różnej liczby plastrów.

O wartości pracy włożonej w proces przecinania wzdłuż najdłuższej osi plastra decyduje wielkość pola przekroju przecinanej powierzchni. Dla wszystkich materiałów wyjściowy wymiar pola przekroju próbek był jednakowy i wynosił 1 cm^2 (średnica = 20 mm x grubość plastra = 5 mm). W wyniku suszenia zmiana ulegały zarówno średnica, jak i wysokość próbek. Dlatego zdecydowano o przeliczaniu wartości pracy przecinania suszy i materiałów uwodnionych na 1 cm^2 przecinanej powierzchni. Przykładowe przebiegi zmiany siły podczas ściskania i przecinania zaprezentowano na rysunkach 12 i 13.



Rys. 12. Przykładowe przebiegi prób ściskania marchwi suszonej konwekcyjnie
Fig. 12. Examples of compression test runs for convection dried carrot



Rys. 13. Przykładowe przebiegi przecinania marchwi suszonej konwekcyjnie
 Fig. 13. Examples of cutting test runs for convection dried carrot

Z przeglądu literatury [Marzec i Pasik 2008, Lewicki i Jakubczyk 2004, Figiel i in. 2006, Stepień i Michalski 2005, Jakubczyk i Ksionek 2006] wynika, że czynnikami istotnie wpływającymi na cechy mechaniczne i reologiczne produktów suszarniczych są zarówno metoda suszenia, obróbka wstępna, jak i długość okresu przechowywania suszy. W niniejszej pracy przeanalizowano zmiany następujących parametrów:

- wartości pracy ściskania,
- wartości pracy przecinania,
- wartości wskaźników charakteryzujących przebieg procesu relaksacji naprężeń.

Analizie poddano zmiany ww. parametrów zarówno dla suszy, jak i dla materiałów ponownie uwodnionych. Uwzględnienie wszystkich czynników wpływających na zmienność cech mechanicznych i reologicznych oraz ich wzajemnych interakcji wymagało opracowania statystycznego wymuszającego transformację danych eksperymentalnych. Dla każdej z grup danych zastosowano inną funkcję stabilizującą. Z tego względu porównywanie wyników badań dla poszczególnych warzyw może mieć miejsce tylko w oparciu o dane eksperymentalne. Dlatego w dalszej części niniejszej pracy zaprezentowano wykresy utworzone zarówno na bazie danych eksperymentalnych, jak i na podstawie danych transformowanych do wieloczynnikowej analizy wariancji.

Dane doświadczalne, będące wartościami średnimi z wielu powtórzeń, zamieszczono w tabelach Z1–Z15, umieszczonych w załączniku.

5.1. Analiza statystyczna wyników badań

Obliczenia statystyczne wykonano przy wykorzystaniu pakietu statystycznego STATISTICA v. 7.1 i 8.0.

Celem analizy statystycznej danych eksperymentalnych była ocena wpływu metody suszenia (konwekcyjne *SK*, sublimacyjne *SS* i mikrofalowe *SMP*) – czynnik *A*, rodzaju obróbki wstępnej (brak obróbki *BO*, blanszowanie *BL*, odwadnianie osmotyczne *OS*) – czynnik *B* i czasu przechowywania suszy (po 6, 12 i 18 miesięcy z uwzględnieniem początku procesu przechowywania – 0 miesięcy) – czynnik *C* na wartość cech mechanicznych, reprezentowanych przez wartości pracy ściskania i pracy przecinania.

Oprócz istotności wpływu pojedynczych efektów czynnika *A*, czynnika *B* i czynnika *C* zbadano również istotność ich wzajemnego współdziałania, czyli tzw. interakcji 1. i 2. rzędu, pozwalające ocenić m.in. wpływ czasu przechowywania (4 różne punkty odniesienia) suszonych warzyw w obrębie każdej z 9. grup związanych z zastosowaną metodą suszenia (*SK*, *SS*, *SMP*) i rodzajem obróbki (*BO*, *BL*, *OS*).

Weryfikacji poddano następujące podstawowe hipotezy H_i dla modelu ANOVA:

- hipoteza H_1 : metoda suszenia nie wpływa na zmiany cech mechanicznych badanych warzyw;
- hipoteza H_2 : rodzaj obróbki nie wpływa na zmiany cech mechanicznych badanych warzyw;
- hipoteza H_3 : czas przechowywania nie wpływa na zmiany cech mechanicznych badanych warzyw;
- hipoteza H_4 : brak efektu współdziałania metody suszenia i rodzaju obróbki (interakcje *AB*);
- hipoteza H_5 : brak efektu współdziałania metody suszenia i czasu przechowywania (interakcje *AC*);
- hipoteza H_6 : brak efektu współdziałania rodzaju obróbki i czasu przechowywania (interakcje *BC*);
- hipoteza H_7 : brak efektu współdziałania wszystkich trzech występujących czynników (interakcje *ABC*).

W celu przeprowadzenia właściwego wnioskowania statystycznego zastosowano model trzykierunkowej analizy wariancji z interakcjami, przyjmując założenie, że efekty badanych czynników (metoda suszenia, rodzaj obróbki wstępnej i czas przechowywania suszy) są stałe i ich wpływ, łącznie z interakcjami, na średnią wartość zmiennej odpowiedzi *Y* ma charakter addytywny, tj.:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta^1_{ij} + \delta^2_{ik} + \delta^3_{jk} + \delta_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (5.1.1)$$

- gdzie: Y_{ijkl} – są obserwacjami zmiennej odpowiedzi (zmiennej zależnej);
 μ – jest średnią ogólną zmiennej odpowiedzi (analizowanej cechy);
 α_i – jest efektem *i*-tego poziomu czynnika *A*, tj. metody suszenia ($i = 1, 2, 3$ odp.: *SK*, *SS*, *SMP*);

β_j – jest efektem j -tego poziomu czynnika B , tj. rodzaju obróbki ($j = 1, 2, 3$ odp.: BO, BL, OS);

γ_k – jest efektem k -tego poziomu czynnika C , tj. czasu przechowywania ($k = 1, 2, 3, 4$ odp.: 0, 6, 12 i 18 miesięcy);

$\delta_{ij}^1, \delta_{ik}^2, \delta_{jk}^3$ – oznaczają efekty interakcji czynników pierwszego rzędu odpowiednio AB, AC i BC ;

δ_{ijk} – reprezentują efekty współdziałania trzech czynników A, B i C (tj. dla 36 różnych jakościowo grup);

ε_{ijkl} – efekt losowy błędów pomiarowych i innych niekontrolowanych czynników.

ε_{ijkl} określa losowy efekt nieskorelowanych błędów pomiarowych i innych niekontrolowanych czynników, mogących zaburzyć wartość zmiennej odpowiedzi, o którym założono, że ma rozkład normalny z wartością oczekiwaną 0 i wspólną nieznaną wariancją σ^2 . Przyjęte założenia implikują, że analizowane cechy są niezależnymi zmiennymi losowymi o rozkładach normalnych z nieznanymi średnimi dla każdej z 36 grup ($i \times j \times k$) ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4$) i z nieznaną, lecz taką samą wariancją σ^2 . Problem sprowadza się do weryfikacji opisanych wyżej hipotez H_i :

$H_1 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$ $H_2 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ $H_3 : \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0$ $H_4 : \delta_{11}^1 = \delta_{12}^1 = \delta_{13}^1 = \delta_{21}^1 = \delta_{22}^1 = \delta_{23}^1 = \delta_{31}^1 = \delta_{32}^1 = \delta_{33}^1 = 0$ $H_5 : \delta_{11}^2 = \delta_{12}^2 = \delta_{13}^2 = \delta_{14}^2 = \delta_{21}^2 = \delta_{22}^2 = \delta_{23}^2 = \delta_{24}^2 = \delta_{31}^2 = \delta_{32}^2 = \delta_{33}^2 = \delta_{34}^2 = 0$ $H_6 : \delta_{11}^3 = \delta_{12}^3 = \delta_{13}^3 = \delta_{14}^3 = \delta_{21}^3 = \delta_{22}^3 = \delta_{23}^3 = \delta_{24}^3 = \delta_{31}^3 = \delta_{32}^3 = \delta_{33}^3 = \delta_{34}^3 = 0$ $H_7 : \delta_{111} = \delta_{112} = \delta_{113} = \delta_{114} = \delta_{121} = \delta_{122} = \dots = \delta_{331} = \delta_{332} = \delta_{333} = \delta_{334} = 0$
--

Każdą z powyższych hipotez H_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) można zweryfikować za pomocą odpowiednich statystyk testowych, które przy założeniu prawdziwości hipotez H_i mają rozkłady F-Snedecora z odpowiednimi stopniami swobody. W celu prowadzenia poprawnego wnioskowania statystycznego i uzyskania wiarygodnych wyników analiz sprawdzono, czy przyjęte założenia modelu są spełnione w granicach przyjętego błędu, określonego przez poziom istotności właściwego testu statystycznego.

W oparciu o rozważania teoretyczne i badania symulacyjne stwierdzono, że ważniejszym założeniem modelu jest jednorodność badanych podgrup (równe wariancje), a duże odstępstwo od tego założenia może w sposób istotny wpłynąć na końcowe wnioski statystyczne. Jednym z ważniejszych etapów poprzedzających analizę wariancji jest

zastosowanie wobec zmiennych odpowiedzi przekształceń stabilizujących wariancję w podgrupach [Curtiss 1943, Bickel i Doksum 1977].

Przedstawienie na wykresie odchyłeń standardowych w zależności od ich średnich grupowych pozwala wychwycić te obiekty grupowe, które najbardziej wpływają na odstępstwa od jednorodności; innymi słowy, średnie w grupach nie powinny być skorelowane z odchyleniami standardowymi w grupach. Taki wykres pozwala także na podjęcie decyzji o usunięciu elementarnych obserwacji w danej grupie, które obciążone są zbyt dużymi błędami losowymi.

Zgodnie z twierdzeniem o przekształceniach stabilizujących wariancję mówiącym, że jeżeli φ wyraża związek pomiędzy średnimi \bar{Y}_i i wariancjami S_i^2 dla zmiennej Y w wyróżnionych zbiorowościach, to transformacja stabilizująca wariancję dana jest wzorem:

$$Z = \int \frac{c}{\sqrt{\varphi(y)}} dy \quad (5.1.2)$$

przy czym c jest przybliżoną wariancją nowej zmiennej [Curtiss 1943].

Stąd, dla zależności φ pomiędzy wartościami oczekiwanymi μ a odchyleniami standardowymi σ :

$$\log(\sigma) = a \cdot \log(\mu) + b \quad (5.1.3)$$

otrzymuje się:

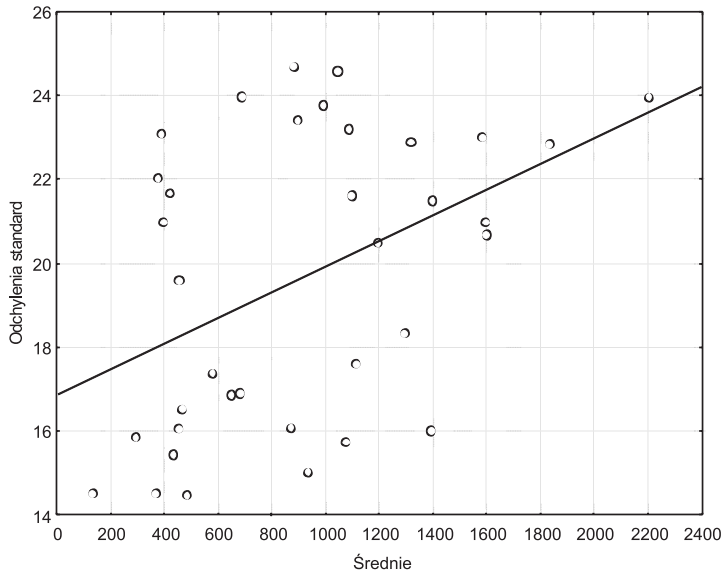
$$\varphi(\mu) = \frac{c \cdot e^{-b}}{1-a} \cdot \mu^{1-a} \quad (5.1.4)$$

czyli ostatecznie przekształcenie stabilizujące wariancję dla zmiennej wyjściowej Y jest postaci Y^{1-a} [Bickel i Doksum 1977].

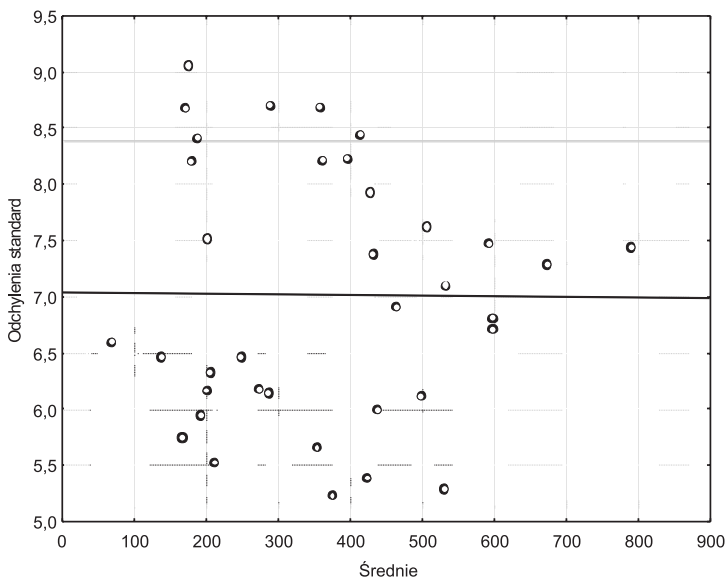
Założenie o równości wariancji w każdej z 36 podgrup zweryfikowano, korzystając z testu Levene'a i dodatkowo przy większych rozbieżnościach dla danych eksperymentalnych zastosowano odporniejszy test zaproponowany przez Browna i Forsytha.

Dodatkowym efektem zastosowania potęgowej transformacji, stabilizującej wariancję w rozważnych modelach ANOVA, była normalizacja reszt z modelu, co zaprezentowano na przykładzie wartości pracy przecinania suszu marchwi (rys. 14 i 15).

Rysunek 15, przedstawiający brak istotnej korelacji między średnimi i odchyleniami standardowymi i niewielki zakres zmienności międzygrupowej, potwierdza wyniki testów jednorodności wariancji Levene'a i Browna-Forsytha o braku podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji w grupach na poziomie istotności $\alpha = 0.05$.

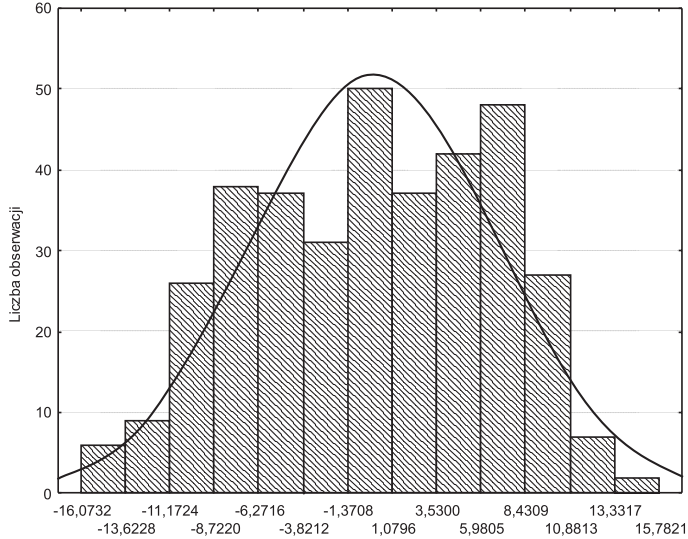


Rys. 14. Zależności odchyłek standardowych od średnich grupowych przed transformacją
 Fig. 14. Standard deviation – group mean relation before transformation

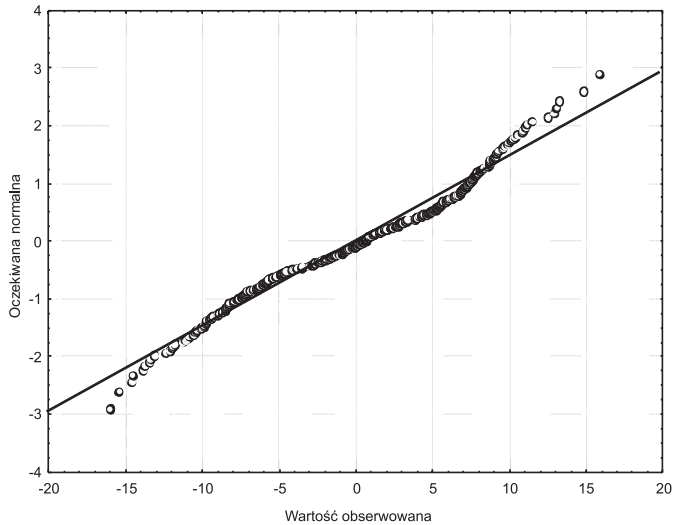


Rys 15. Zależności odchyłek standardowych od średnich grupowych po transformacji stabilizującej wariancję grupowe $\varphi(Pp) = Pp^{1-a}$.
 Fig. 15. Standard deviation – group mean relation after stabilization transformation of group variance $\varphi(Pp) = Pp^{1-a}$.

Normalność rozkładu dla każdej zmiennej odpowiedzi (badane cechy), a dokładniej dla reszt z modelu, sprawdzono w sposób przybliżony, korzystając z wykresu kwantylowego dla odpowiednich reszt z modelu (metoda graficzna, będąca pewnym uzupełnieniem testu zgodności Kołmogorowa – Smirnova) i za pomocą testu Shapiro-Wilka (rys. 16 i 17).



Rys. 16. Krzywa Gaussa rozkładu normalnego reszt z modelu na tle histogramu częstości
 Fig. 16. Normal distribution Gaussian curve for the model residue against the back-ground of frequency histogram



Rys. 17. Wykres kwantylowy dla reszt z modelu przy założeniu rozkładu normalnego
 Fig. 17. Quantile diagram for the model residue on normal distribution assumption

Rysunki 16 i 17 potwierdzają pewną zgodność rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym (dla testu Kołmogorowa-Smirnowa $p < 0,15$).

W przypadku odrzucenia hipotezy H_0 , przyjmuje się hipotezę alternatywną, orzekającą, że średnie efekty badanych czynników różnią się między sobą. W tym celu korzysta się z testu porównań wielokrotnych Tukeya (HSD) lub, w przypadku nierównych licznosci, ze zmodyfikowanego testu Tukeya (tj. testu Spjotvolla-Stoline'a) i tworzy się tzw. grupy jednorodne „obiektów”, tj. grupy „obiektów” o podobnych średnich efektach działania (tab. 3).

Tabela 3

Table 3

Sposób wyodrębnienia grup homogenicznych, tj. grup o zbliżonych przeciętnych efektach
Separation way of homogeneous group

Nr podki.	Test HSD Tukeya; zmienna reg1_log (marchew_suszPp) Grupy jednorodne, alfa = 0,05				Błąd: MS międzygrupowe = 50,326, df = 324,00																							
	M_susz	obróbka	czas	reg1_log Średnia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
17	SS	BL	0 mies.	68,07	****																							
15	SS	BO	12 mies.	137,19		****																						
19	SS	BL	12 mies.	165,93			****																					
18	SS	BL	6 mies.	169,89			*****																					
20	SS	BL	18 mies.	174,29			*****																					
22	SS	OS	6 mies.	178,28				*****																				
21	SS	OS	0 mies.	186,93					*****																			
29	SMP	BL	0 mies.	191,96						*****																		
24	SS	OS	18 mies.	199,93							*****																	
13	SS	BO	0 mies.	200,42								*****																
23	SS	OS	12 mies.	205,07									****															
14	SS	BO	6 mies.	211,19										****														
16	SS	BO	18 mies.	247,15											****													
1	SK	BO	0 mies.	272,35												****												
31	SMP	BL	12 mies.	285,63													****											
3	SK	BO	12 mies.	287,29														****										
10	SK	OS	6 mies.	352,85															****									
9	SK	OS	0 mies.	356,67																****								
32	SMP	BL	18 mies.	361,41																	****							
25	SMP	BO	0 mies.	374,53																		****						
11	SK	OS	12 mies.	394,44																			****					
12	SK	OS	18 mies.	413,13																				****				
2	SK	BO	6 mies.	423,05																					****			
30	SMP	BL	6 mies.	427,41																						****		
34	SMP	OS	6 mies.	430,98																							****	
4	SK	BO	18 mies.	436,41																							****	
6	SK	BL	6 mies.	463,42																								****
33	SMP	OS	0 mies.	497,06																								****
35	SMP	OS	12 mies.	505,58																								****
8	SK	BL	18 mies.	530,30																								****
27	SMP	BO	12 mies.	531,72																								****
5	SK	BL	0 mies.	592,59																								****
26	SMP	BO	6 mies.	597,00																								****
36	SMP	OS	18 mies.	597,31																								****
28	SMP	BO	18 mies.	672,65																								****
7	SK	BL	12 mies.	789,37																								****

We wszystkich analizach podano dokładny poziom istotności testu, aby porównać z najczęściej przyjmowanym poziomem istotności równym 0,05, i tym samym określić, jak bardzo badane przeciętne efekty są statystycznie różne ($p < 0,05$) lub też stwierdzić, jak bardzo są sobie bliskie ($p > 0,05$). W kolejnych kolumnach tabeli 3 kolorem różowym zaznaczono w porządku rosnącym (ze względu na oszacowane wartości przeciętnych efektów δ_{ijk}) grupy homogeniczne.

Wyniki przykładowej analizy wariancji przedstawiono w tabeli 4, z której wynika, że wszystkie hipotezy H_1, \dots, H_7 należy odrzucić na poziomie istotności p wskazanym w ostatniej kolumnie. Najciekawszą i najbardziej bogatą w odpowiedzi jest hipoteza alternatywna do hipotezy H_7 , orzekająca, że efekty wzajemnego współdziałania wszystkich trzech czynników są statystycznie istotne. Jeśli testowane hipotezy zostały odrzucone ($p < 0,05$), to stosuje się dalszą analizę porównań wielokrotnych według odpowiedniego testu Tukeya, czyli tzw. kontrasty główne.

Tabela 4
Table 4

Wyniki analizy wariancji
Analysis of variance results

Jednowymiarowe testy istotności na przykładzie pracy przecinania suszu z marchwi One-dimensional tests of significance based on dried carrot cutting work example					
	SS	Stopnie Degrees	MS	F	p
Wyraz wolny – absolute term	46436381	1	46436381	922712,4	0,00
Metoda suszenia – Drying method	5872415	2	2936207	58343,8	0,00
Obróbka wstępna – Pretreatment	12226	2	6113	121,5	0,00
Czas przechowywania suszy – Storage time	452655	3	150885	2998,2	0,00
Metoda suszenia*obróbka wstępna Drying method*pretreatment	2637352	4	659338	13101,4	0,00
Metoda suszenia*czas przechowywania suszy Drying method*storage time	311257	6	51876	1030,8	0,00
Obróbka wstępna*czas przechowywania suszy Pretreatment*storage time	467822	6	77970	1549,3	0,00
Metoda suszenia*obróbka wstępna*czas p.s. Drying method*pretreatment*storage time	689824	12	57485	1142,3	0,00
Błąd – Error	16306	324	50		

5.2. Praca ściskania suszy warzywnych

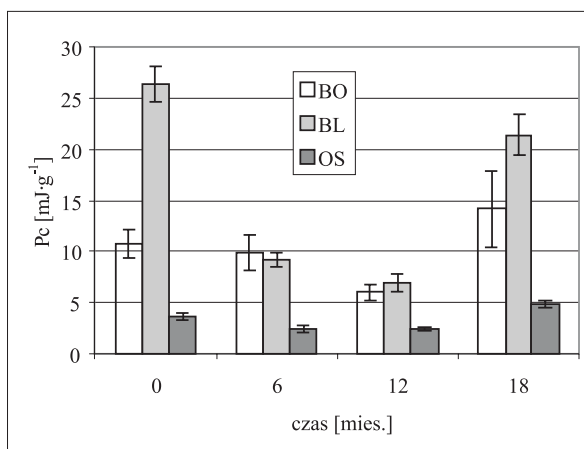
W oparciu o dane eksperymentalne umieszczone w tabelach Z1, Z3 i Z5 zaprezentowano wykresy pozwalające na analizę wpływu poszczególnych czynników na wartości pracy ściskania suszy badanych warzyw (rys. 18–26). Niezależnie od zastosowanej obróbki wstępnej surowców susze uzyskane metodą konwekcyjną charakteryzują się obni-

zoną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do suszy otrzymanych pozostałymi dwoma metodami suszenia. Wraz z wydłużaniem okresu próżniowego przechowywania suszy różnice w odporności na ściskanie pomiędzy produktami uzyskanymi różnymi metodami odwadniania ulegają istotnemu zmniejszeniu.

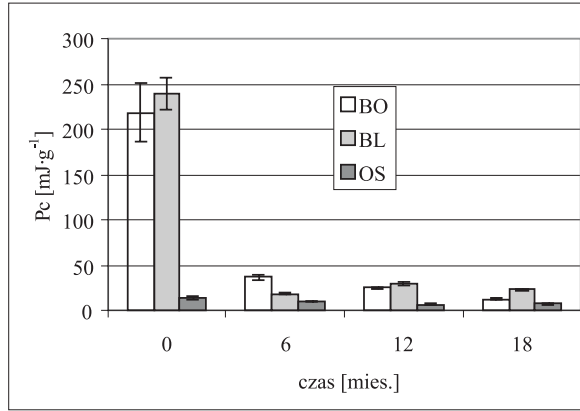
Wstępne odwodnienie osmotyczne każdego z surowców spowodowało istotne obniżenie wartości pracy ściskania niezależnie od zastosowanej metody suszenia. Jedynie dla selera nie zaobserwowano wyraźnych różnic w odporności na ściskanie pomiędzy suszami uzyskanymi z surowca blanszowanego lub nie poddanego obróbce wstępnej (rys. 25–26). Dla marchwi i pietruszki stwierdzono istotny wpływ blanszowania surowca na wartości pracy ściskania. Zależność jest szczególnie widoczna dla produktów badanych bezpośrednio po suszeniu, gdzie blanszowanie pietruszki obniża, natomiast blanszowanie marchwi podwyższa odporność na ściskanie suszy.

Nie zaobserwowano wyraźnego i jednoznacznego wpływu czasu próżniowego przechowywania suszy na wartości pracy ściskania marchwi. W przypadku pietruszki, a szczególnie selera, odporność na ściskanie suszy maleje w trakcie przechowywania.

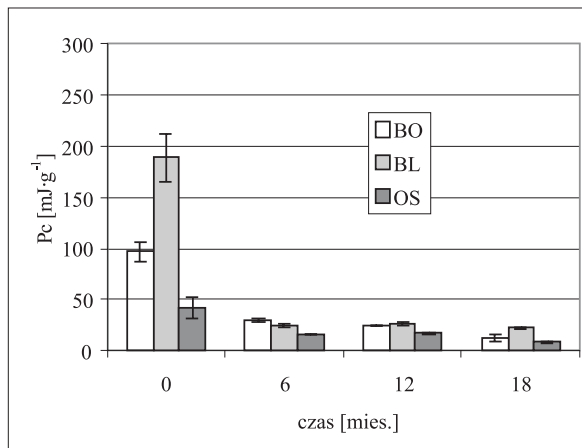
Spośród suszy uzyskanych metodą konwekcyjną najwyższą wartością pracy ściskania charakteryzuje się susz z pietruszki, przy zbliżonym poziomie odporności na ściskanie dla marchwi i selera. Dla suszenia sublimacyjnego susze z selera mają najwyższą, a susze z marchwi najniższą wytrzymałość na ściskanie. Suszenie mikrofalowe pozwoliło uzyskać susze z marchwi o obniżonej odporności na ściskanie w stosunku do suszy z pietruszki i z selera.



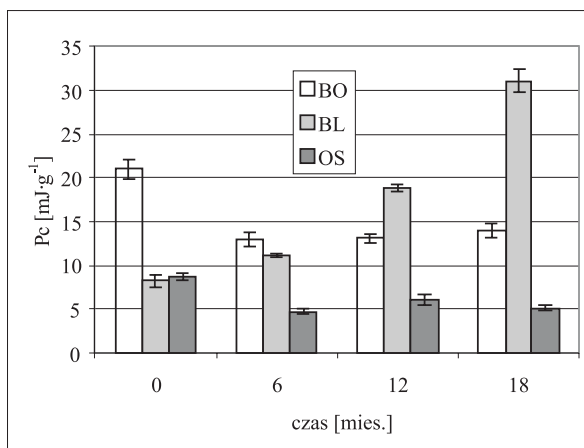
Rys. 18. Wartość pracy ściskania marchwi suszonej konwekcyjnie
 Fig. 18. Compression work values for convective dried carrot



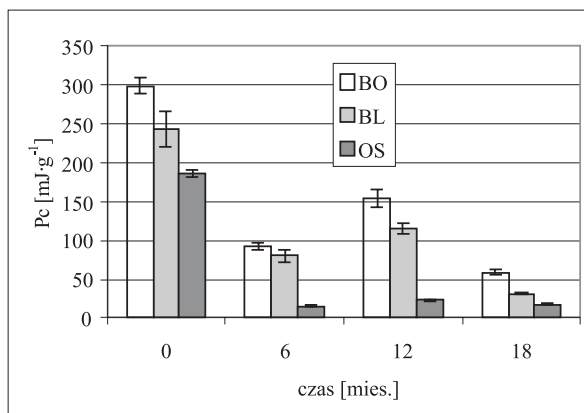
Rys. 19. Wartość pracy ściskania marchwi suszonej sublimacyjnie
 Fig. 19. Compression work values for freeze dried carrot



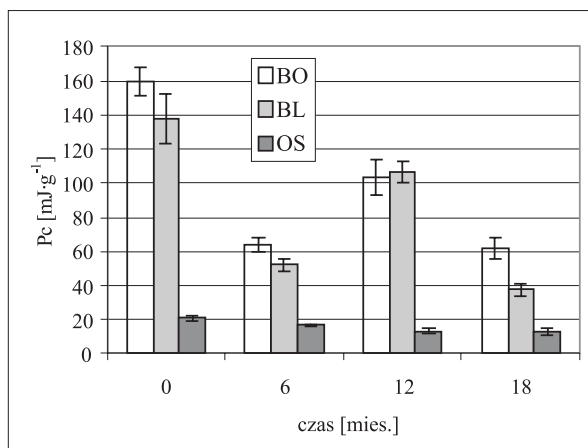
Rys. 20. Wartość pracy ściskania marchwi suszonej mikrofalowo
 w warunkach obniżonego ciśnienia
 Fig. 20. Compression work values for vacuum-microwave dried carrot



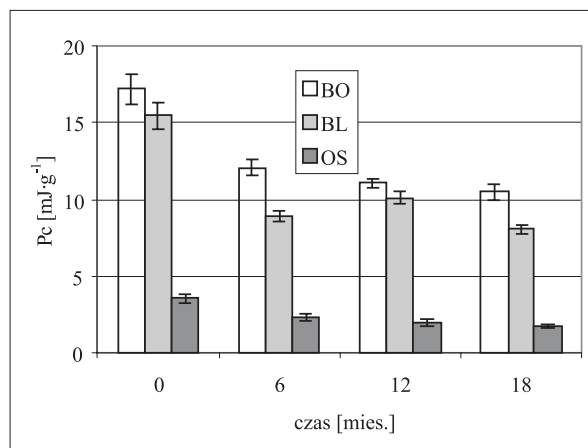
Rys. 21. Wartość pracy ściskania pietruszki suszonej konwekcyjnie
 Fig. 21. Compression work values for convective dried parsley



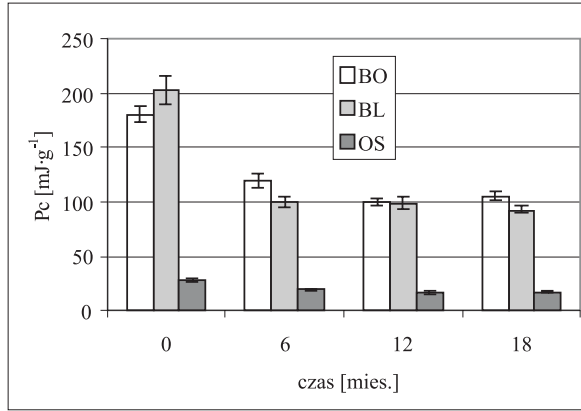
Rys. 22. Wartość pracy ściskania pietruszki suszonej sublimacyjnie
 Fig. 22. Compression work values for freeze dried parsley



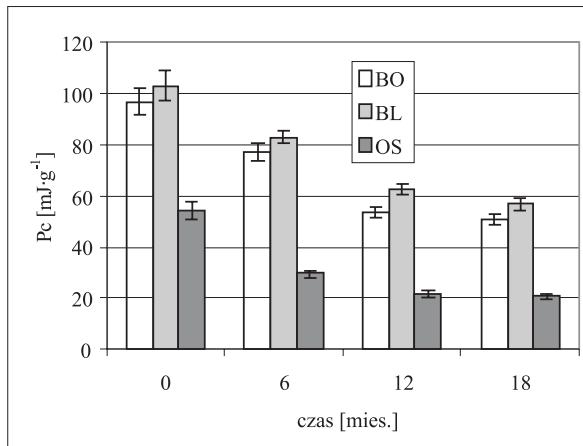
Rys. 23. Wartość pracy ściskania pietruszki suszonej mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia
 Fig. 23. Compression work values for vacuum-microwave dried parsley



Rys. 24. Wartość pracy ściskania selera suszonego konwekcyjnie
 Fig. 24. Compression work values for convective dried celery



Rys. 25. Wartość pracy ściskania selera suszonego sublimacyjnie
 Fig. 25. Compression work values for freeze dried celery



Rys. 26. Wartość pracy ściskania selera suszonego mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia
 Fig. 26. Compression work values for vacuum-microwave dried celery

Analiza danych eksperymentalnych dla marchwi, pietruszki i selera wykazała istotność wpływu poszczególnych czynników na wartości pracy ściskania suszy. Dodatkowo występują interakcje pomiędzy poszczególnymi czynnikami. Wykonanie pełnej analizy wymagało zatem wykorzystania technik statystycznych opisanych w rozdziale 5.1. Dalsze rozważania dotyczą wartości pracy ściskania po transformacji (wg wzorów 5.1.2–5.1.4) umożliwiające wykonanie wieloczynnikowej analizy wariancji.

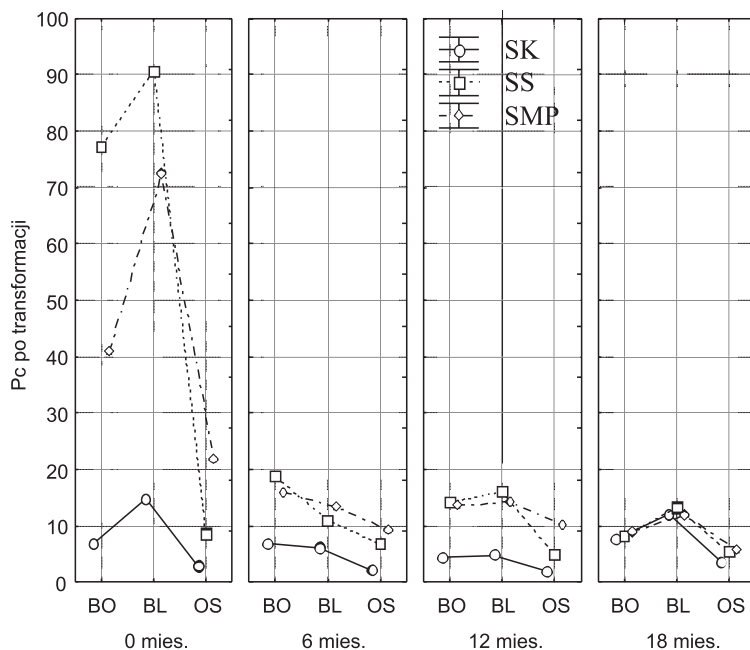
Badania suszy wykazały, że produkt uzyskany metodą konwekcyjną charakteryzuje się najniższą wytrzymałością na ściskanie. Do odmiennych wniosków doszli Bondaruk i in. [2007], którzy stwierdzili, że susz ziemniaczany uzyskany metodą konwekcyjną charakteryzuje się wyższą odpornością na ściskanie niż susz otrzymany metodą mikrofalowo-podciśnieniową. Przyczyną tych rozbieżności może być fakt, że analizowali jedynie wartości sił maksymalnych występujących w trakcie ściskania próbek. Zastosowanie odwadniania osmotycznego jako obróbki wstępnej dodatkowo obniża odporność na ściskanie. Można to wytłumaczyć następująco: obniżenie wytrzymałości na ściskanie jest związane ze zmniejszeniem sił spajających sąsiednie komórki przez blaszkę środkową. Istotność wpływu odwadniania osmotycznego na odporność mechaniczną tkanek jabłek potwierdzają badania Farrisa i in. [2008], co wykazali zarówno poprzez testy ściskania, jak i zginania. Temperatura zastosowana podczas suszenia konwekcyjnego była wystarczająca, aby blaszka środkowa uległa częściowemu rozpuszczeniu. Dzięki temu komórki mogły się łatwiej względem siebie przesuwać podczas oddziaływania sił zewnętrznych, co skutkowało mniejszymi wartościami pracy ściskania. Wysoka temperatura medium blanszującego jest również tym czynnikiem, który negatywnie oddziałuje na wiązania kowalencyjne lub wodorowe, które podtrzymują krystaliczną strukturę tworzoną przez łańcuchy celulozy [Becker i in. 2003, Gerschenson i in. 2001]. Leeratanarak i in. [2006] potwierdzili wpływ blanszowania na obniżenie twardości suszu ziemniaczanego, przy czym wykazali, że długość trwania procesu nie zmienia istotnie twardości produktu. Odwodnienie osmotyczne surowca jest związane z wnikaniem substancji osmoaktywnej do wnętrza komórek, w trakcie którego dochodzi do przerwania ciągłości struktury. Zjawisko to zostało zaobserwowane na zdjęciach mikroskopowych zaprezentowanych w rozdziale 5.5. **Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają hipotezy robocze sformułowane w rozdziale 2.** W trakcie próżniowego przechowywania produktu następuje niewielki, ale istotny statystycznie spadek wartości pracy ściskania. Trend ten jest szczególnie widoczny po pierwszym okresie przechowywania. Niewielkie zmiany wytrzymałości na ściskanie zachodzące w czasie magazynowania suszy wynikają z mikromigracji wilgoci wewnątrz komórek. W trakcie suszenia woda usuwana jest głównie z protoplastu, a dopiero w następnej kolejności ze ściany komórkowej, gdzie połączona jest z hemicelulozą i pektynami – głównym budulcem nierozciągliwego matriksu [Horubała 1975].

Spośród badanych suszy z marchwi najwyższą wytrzymałością na ściskanie charakteryzuje się produkt uzyskany z surowca blanszowanego lub niepoddanego obróbce wstępnej przed suszeniem sublimacyjnym. Najniższą wytrzymałość na ściskanie ma susz uzyskany metodą konwekcyjną z marchwi odwodnionej osmotycznie. Wyniki otrzymane dla suszy przechowywanych przez 12 miesięcy stanowią grupę jednorodną, a więc nie różniącą się statystycznie w obrębie badanej cechy. Natomiast wytrzymałość na ściskanie suszu przechowywanego przez 18 miesięcy jest istotnie niższa od wytrzymałości suszu

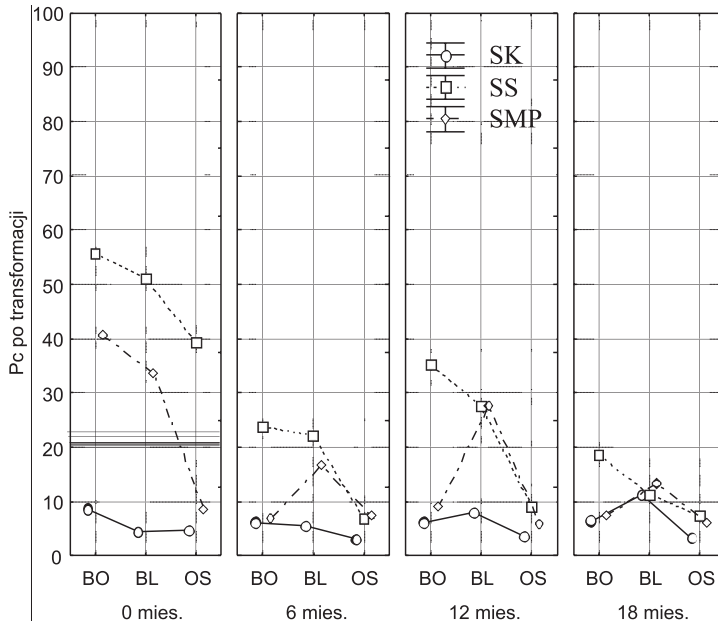
badanego bezpośrednio po suszeniu (rys. 27). Połączenie punktów na rysunkach nie ma sugerować zależności funkcyjnych, a jedynie pomóc w wizualizacji danych.

Podobnie jak dla marchwi najwyższymi wytrzymałościami na ściskanie suszy z pietruszki charakteryzują się produkty uzyskane z surowca blanszowanego lub niepoddanego obróbce wstępnej przed suszeniem sublimacyjnym, natomiast najniższą wytrzymałość na ściskanie ma susz uzyskany metodą konwekcyjną z surowca wstępnie odwodnionego osmotycznie (rys. 28). Identyczną zależność zaobserwowano dla selera (rys. 29). Wartości na osi rzędnych odpowiadają wartościom pracy ściskania, ale po transformacji statystycznej. Dlatego na wykresach nie zamieszczono jednostek.

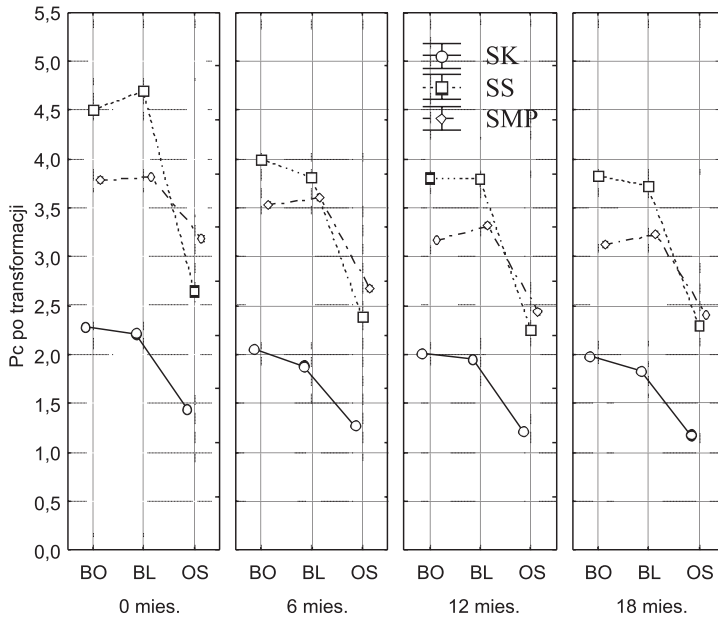
Największe różnice w wytrzymałości suszy, pomiędzy materiałem najbardziej i najmniej odpornym na ściskanie, występują dla marchwi (90,58–1,96), mniejsze dla pietruszki (55,68–3,00), a najmniejsze dla selera (4,69–1,18). Oznacza to, że marchew jest warzywem, którego wytrzymałość na ściskanie może być modyfikowana w stopniu największym, poprzez zastosowanie odpowiednich kombinacji metod suszenia i zabiegów wstępnych.



Rys. 27. Wytrzymałość na ściskanie suszonej marchwi
Fig. 27. Compressive strength of dried carrot



Rys. 28. Wytrzymałość na ściskanie suszonej pietruszki
 Fig. 28. Compressive strength of dried parsley



Rys. 29. Wytrzymałość na ściskanie suszonego selera
 Fig. 29. Compressive strength of dried celery

Różnice w odporności na ściskanie suszy uzyskanych badanymi metodami suszenia mogą wynikać również z innej porowatości produktów. Badania Marzec i Pasika [2008], Nowak i Krzywoszyńskiego [2007] oraz Łapczyńskiej-Kordon [2000] wykazały istotny wpływ metody suszenia na porowatość suszy. Największą porowatością charakteryzuje się susz sublimacyjny, mniejszą susz mikrofalowy, a najmniejszą susz konwekcyjny. Wiąże się to ze skurczem materiału, który jest największy dla suszu konwekcyjnego, a najmniejszy dla suszu sublimacyjnego [Hsu i in. 2003, Krzykowski i Rydzak 2001, Sanga i in. 2002]. Wielkość skurczu suszarniczego wpływa na stopień pofałdowania powierzchni próbek oraz na powierzchniowe twardnienie materiału. Ściskanie warstwy ułożonych na sobie plastrów powodowało, że uzyskany wynik nie był związany tylko z badanym materiałem, ale również z wielkością przestrzeni powietrznych między plastrami. Wyraźna jest następująca zależność: im większy stopień pofałdowania próbek i mniejsza porowatość materiału, tym wyższa odporność suszy na ściskanie.

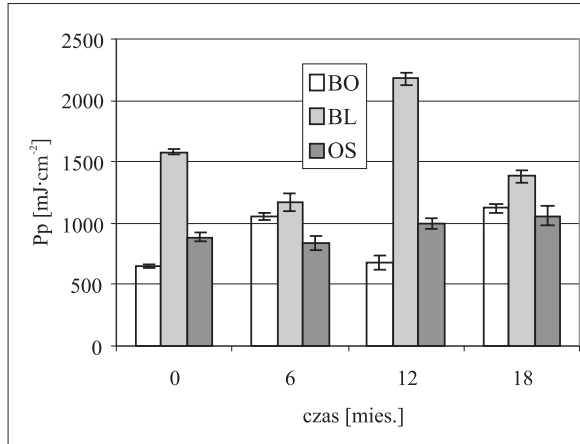
5.3. Praca przecinania suszy warzywnych

Dane eksperymentalne zamieszczone w tabelach Z1, Z3 i Z5 posłużyły do stworzenia wykresów przedstawiających wpływ trzech analizowanych czynników na wartości pracy przecinania suszonych warzyw (rys. 30–38).

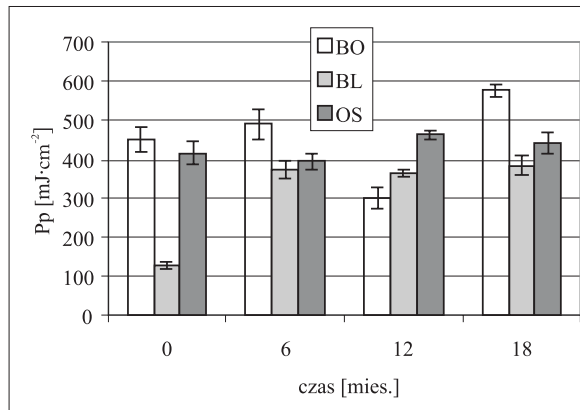
Suszenie sublimacyjne powoduje obniżenie wytrzymałości na przecinanie suszy w stosunku do wytrzymałości produktów uzyskanych pozostałymi metodami odwadniania. Zależność utrzymuje się przez cały okres próżniowego przechowywania suszy. Suszenie konwekcyjne pozwala uzyskać produkt charakteryzujący się podwyższoną wartością pracy przecinania, co szczególnie wyraźnie zaobserwowano dla selera (rys. 36–38). W przypadku pozostałych dwóch warzyw różnice w odporności na przecinanie suszy konwekcyjnych i mikrofalowych są mniej jednoznaczne.

Wpływ obróbki wstępnej na odporność suszy warzywnych na przecinanie jest różny w zależności od zastosowanej metody suszenia. Blanszowanie lub odwadnianie osmotyczne warzyw jedynie przed suszeniem konwekcyjnym powoduje wzrost wartości pracy przecinania suszy w stosunku do produktów pochodzących z surowców niepoddanych zabiegom wstępnym (rys. 30, 33 i 36). W większości przypadków wstępne odwodnienie osmotyczne warzyw przed suszeniem sublimacyjnym lub mikrofalowym również skutkuje uzyskaniem suszy o podwyższonej odporności na przecinanie, w stosunku do produktów pochodzących z surowców niepoddanych zabiegom wstępnym lub blanszowanych.

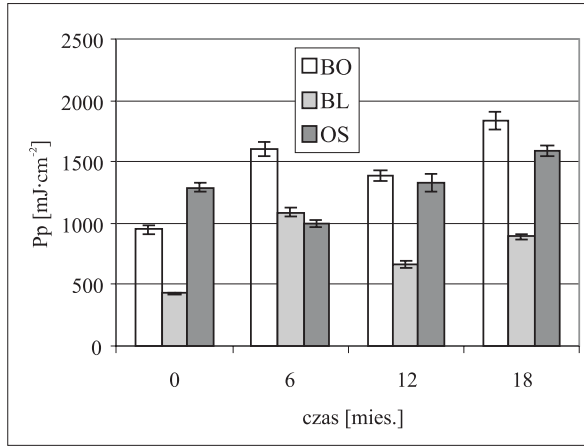
Długość czasu próżniowego przechowywania suszy warzywnych wpływa w niewielkim stopniu na ich wytrzymałość na przecinanie. W wielu przypadkach zauważalna jest niewielka tendencja wzrostowa, szczególnie pomiędzy początkowym i końcowym okresem przechowywania. Największą stabilnością w zakresie odporności na przecinanie charakteryzują się susze z marchwi i selera odwodnione sublimacyjnie oraz susze z pietruszki uzyskane metodą konwekcyjną.



Rys. 30. Wartość pracy przecinania marchwi suszonej konwekcyjnie
 Fig. 30. Cutting work values for convective dried carrot

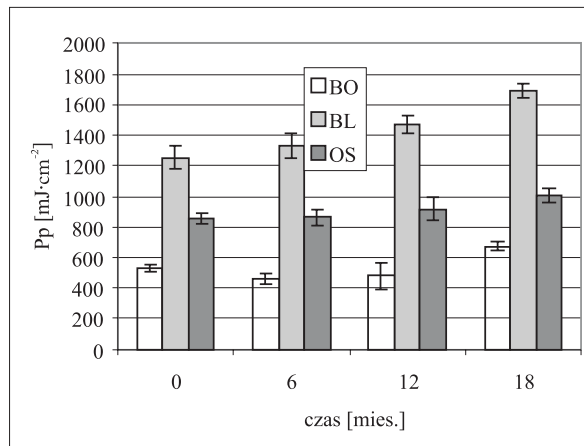


Rys. 31. Wartość pracy przecinania marchwi suszonej sublimacyjnie
 Fig. 31. Cutting work values for freeze dried carrot



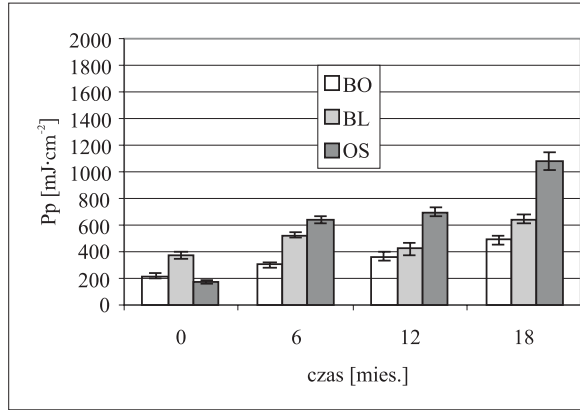
Rys. 32. Wartość pracy przecinania marchwi suszonej mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia

Fig. 32. Cutting work values for vacuum-microwave dried carrot

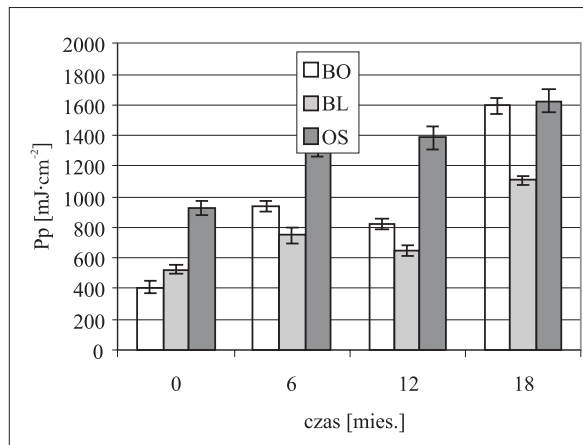


Rys. 33. Wartość pracy przecinania pietruszki suszonej konwekcyjnie

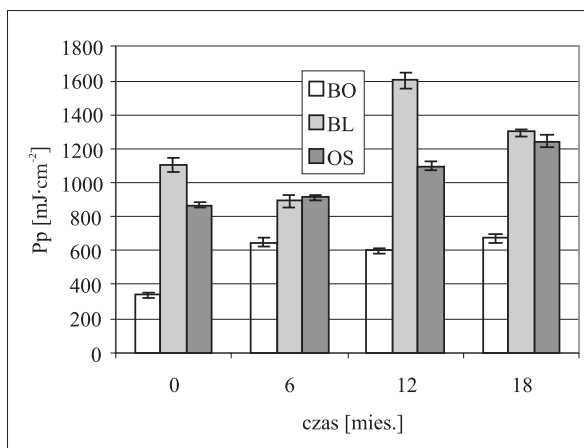
Fig. 33. Cutting work values for convective dried parsley



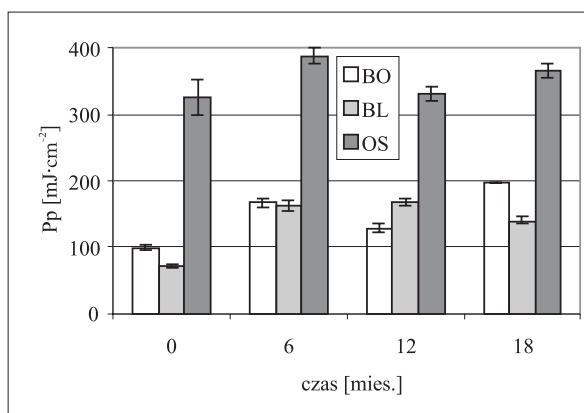
Rys. 34. Wartość pracy przecinania pietruszki suszonej sublimacyjnie
 Fig. 34. Cutting work values for freeze dried parsley



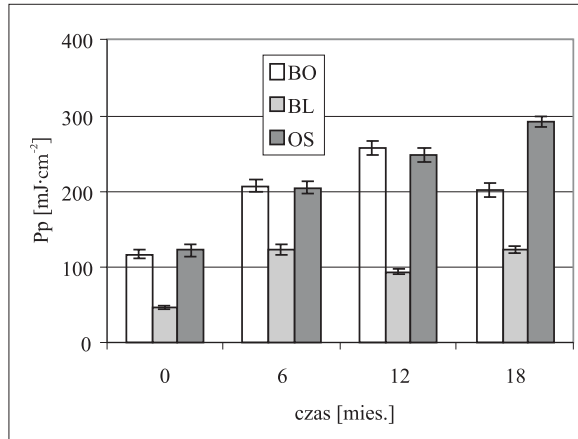
Rys. 35. Wartość pracy przecinania pietruszki suszonej mikrofalowo
 w warunkach obniżonego ciśnienia
 Fig. 35. Cutting work values for vacuum-microwave dried parsley



Rys. 36. Wartość pracy przecinania selera suszonego konwekcyjnie
 Fig. 36. Cutting work values for convective dried celery



Rys. 37. Wartość pracy przecinania selera suszonego sublimacyjnie
 Fig. 37. Cutting work values for freeze dried celery



Rys. 38. Wartość pracy przecinania selera suszonego mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia
 Fig. 38. Cutting work values for vacuum-microwave dried celery

Najistotniejsze różnice w odporności suszy na przecinanie pomiędzy badanymi warzywami zaobserwowano dla selera suszonego sublimacyjnie lub mikrofalowo, który charakteryzuje się istotnie niższymi wartościami pracy przecinania. O ile marchew i pietruszka suszone konwekcyjnie nie wykazują różnic w wytrzymałości na przecinanie, to w przypadku suszenia sublimacyjnego i mikrofalowego produkty uzyskane z pietruszki mają wyższą odporność na przecinanie niż susze z marchwi.

W dalszej części rozdziału przedstawiono analizę statystyczną wyników opartą o transformowane wartości pracy przecinania.

Badania wytrzymałości suszy warzywnych na przecinanie wykazały, że produkty uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się obniżoną odpornością na przecinanie w stosunku do wytrzymałości produktów uzyskanych podczas suszenia konwekcyjnego lub mikrofalowego. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne na przykładzie marchwi i pietruszki (rys. 39 i 40). Metoda sublimacyjna pozwala uzyskać produkt o minimalnym skurczu suszarniczym, co powoduje, że gęstość produktu jest najniższa w stosunku do gęstości suszy uzyskanych pozostałymi dwiema metodami. Opór napotykaną przez nóż tnący w trakcie przecinania jest związany ze stanem ścian komórkowych. Susze warzywne uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się komórkami o cienkich i delikatnych ścianach komórkowych, co zaprezentowano w rozdziale 5.5. **Znajduje więc potwierdzenie hipoteza H_1 sformułowana w rozdziale 2.**

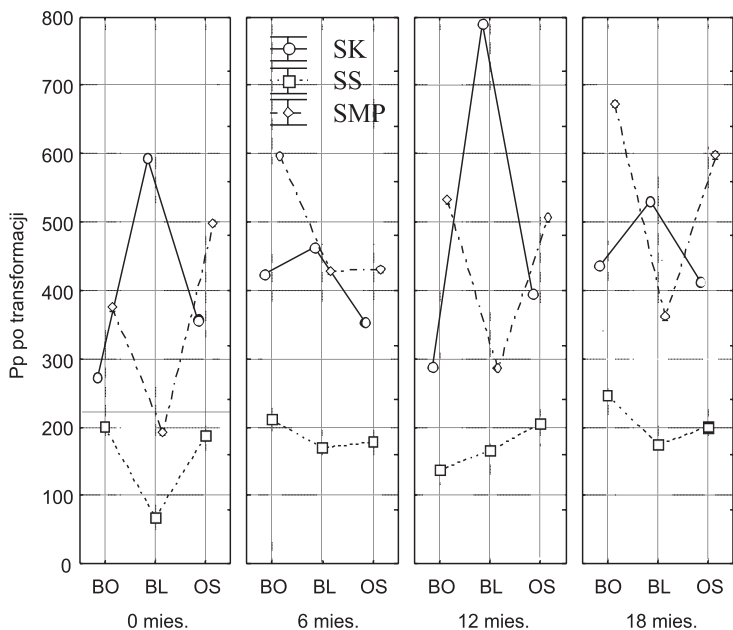
Zaskakujący jest wpływ zabiegów wstępnych wykonywanych przed suszeniem na zmiany zachodzące w obrębie analizowanej cechy. Blanszowanie wykonane przed suszeniem konwekcyjnym pozwala uzyskać produkt o podwyższonej wytrzymałości na przecinanie w stosunku do produktów pochodzących z surowców odwodnionych osmotycznie lub niepoddanych zabiegom wstępnym. Z kolei zabieg ten wykonany przed suszeniem mikrofalowym powoduje skutek odwrotny – obniża odporność na przecinanie suszy. Zależność tę potwierdzono dla wszystkich badanych warzyw. Można przypuszczać, że to wpływ samej metody suszenia jest decydujący w odniesieniu do wartości pracy

przecinania. Intensywność usuwania wody z komórek roślinnych podczas suszenia mikrofalowego jest znacznie większa niż podczas suszenia konwekcyjnego. Prawdopodobnie wiąże się to z powstaniem naprężeń w ścianach komórkowych, które ulegają pofałdowaniu, a w skrajnych przypadkach pęknięciu jeszcze przed zakończeniem testu. Taki mechanizm przecinania warzyw potwierdzili Góral i Kluza [2009] oraz Seifert i in. [2003]. Nieciągłości struktury powinny pojawić się szczególnie wyraźnie na zdjęciach mikroskopowych materiałów po ponownym uwodnieniu, co potwierdzono podczas analizy struktury wewnętrznej zaprezentowanej w rozdziale 5.5.

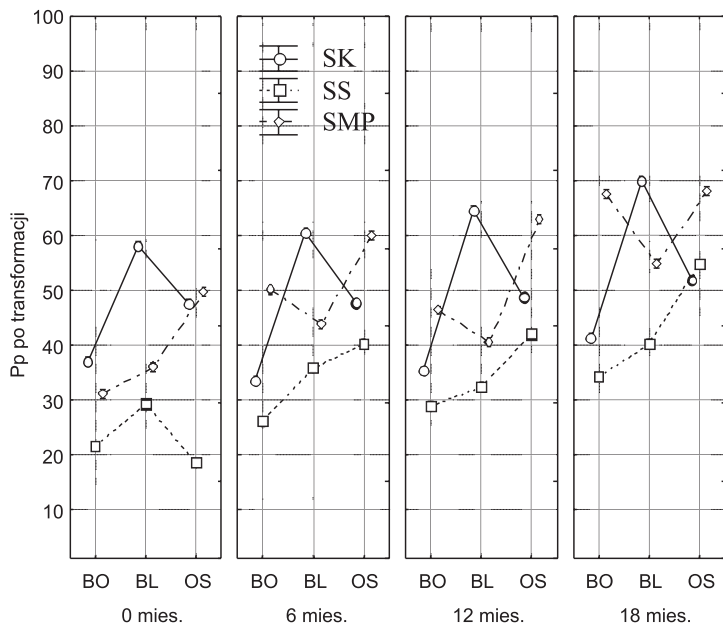
Również wpływ wnikania substancji osmoaktywnej do przestrzeni międzymicelarnej ścian komórkowych jest ściśle powiązany z metodą suszenia. Występują silne interakcje pomiędzy poszczególnymi czynnikami, **co potwierdza hipotezę roboczą H_3** .

Wpływ czasu próżniowego przechowywania suszy na odporność na przecinanie nie jest wyraźny. W ciągu 18-miesięcznego okresu przechowywania wytrzymałość na przecinanie suszy utrzymuje się na stałym poziomie lub ma niewielką tendencję rosnącą.

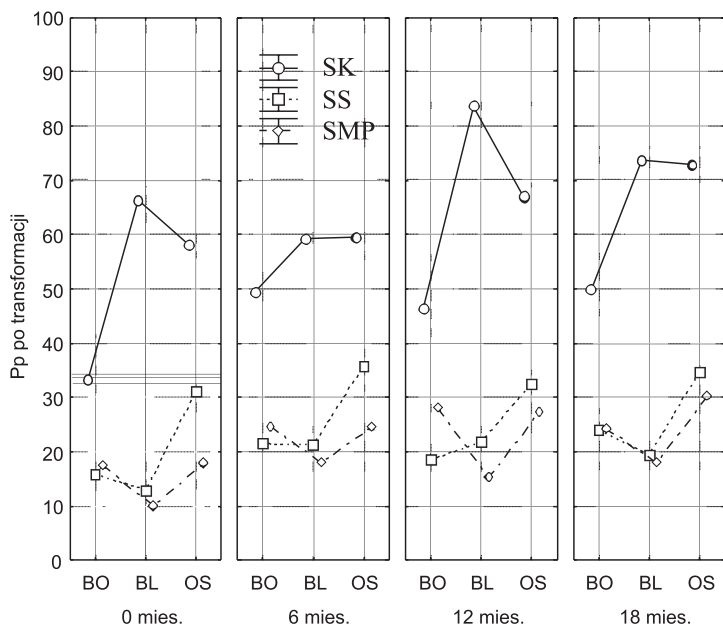
Spośród suszy z marchwi (rys. 39), najwyższą wytrzymałością na przecinanie charakteryzuje się susz uzyskany metodą konwekcyjną z surowca blanszowanego. Niewiele niższą odporność na przecinanie ma produkt suszony mikrofalowo w warunkach obniżonego ciśnienia z surowca odwodnionego osmotycznie lub niepoddanego obróbce wstępnej. Zdecydowanie najniższą wytrzymałość na przecinanie mają susze uzyskane metodą sublimacyjną, bez względu na rodzaj zabiegu wstępnego. Identyczna zależność występuje dla suszu z pietruszki (rys. 40).



Rys. 39. Wytrzymałość na przecinanie suszonej marchwi
Fig. 39. Cutting strength of dried carrot



Rys. 40. Wytrzymałość na przecinanie suszonej pietruszki
 Fig. 40. Cutting strength of dried parsley



Rys. 41. Wytrzymałość na przecinanie suszonego selera
 Fig. 41. Cutting strength of dried celery

W przypadku selera, niezależnie od zastosowanej obróbki wstępnej przed suszeniem konwekcyjnym, susz charakteryzuje się istotnie podwyższoną wytrzymałością na przecinanie w stosunku do wytrzymałości suszy uzyskanych pozostałymi metodami odwadniania. Suszenie sublimacyjne pozwala uzyskać susz o istotnie obniżonej wytrzymałości na przecinanie w odniesieniu do suszu uzyskanego metodą konwekcyjną. Natomiast suszenie mikrofalowe jeszcze bardziej obniża wytrzymałość na przecinanie suszu. Szczególnie jest to widoczne dla produktów uzyskanych z selera blanszowanego lub niepoddanego zabiegom wstępnym (rys. 41).

5.4. Rehydracja suszy

Ponowne uwadnianie suszy jest złożonym procesem, w trakcie którego woda jest wchłaniana przez tkankę roślinną i jednocześnie część rozpuszczalnych składników suchej substancji dyfunduje do roztworu. W wielu pracach analizowano zdolność suszy do rehydracji. Jednakże, widoczny jest brak zgodności w metodykach prowadzenia procesu, a nawet w nazewnictwie. Badacze stosują różny stosunek masy suszu do masy wody, różne temperatury wody, czas trwania procesu i sposoby wstępnego osuszania materiału. Często te same wskaźniki nazywane są w odmienny sposób [Lewicki 1998].

Celem rehydracji suszy z warzyw utrwalonych zaproponowanymi metodami było stworzenie możliwości interpretacji zmian cech mechanicznych i reologicznych materiałów ponownie uwodnionych oraz ocena stopnia destrukcyjnego oddziaływania poszczególnych technik suszenia i zabiegów wstępnych na suszoną tkankę roślinną. Dlatego obliczono wartości ubytków suchej substancji, przyrostu masy próbki i przyrostu masy wody w trakcie rehydracji, tak jak proponuje Witrowa-Rajchert [1999]. Szczególnie pomocna do wyjaśniania obserwowanych różnic w obrębie cech mechanicznych i reologicznych może być analiza ubytków rozpuszczalnych składników suchej substancji w trakcie uwadniania.

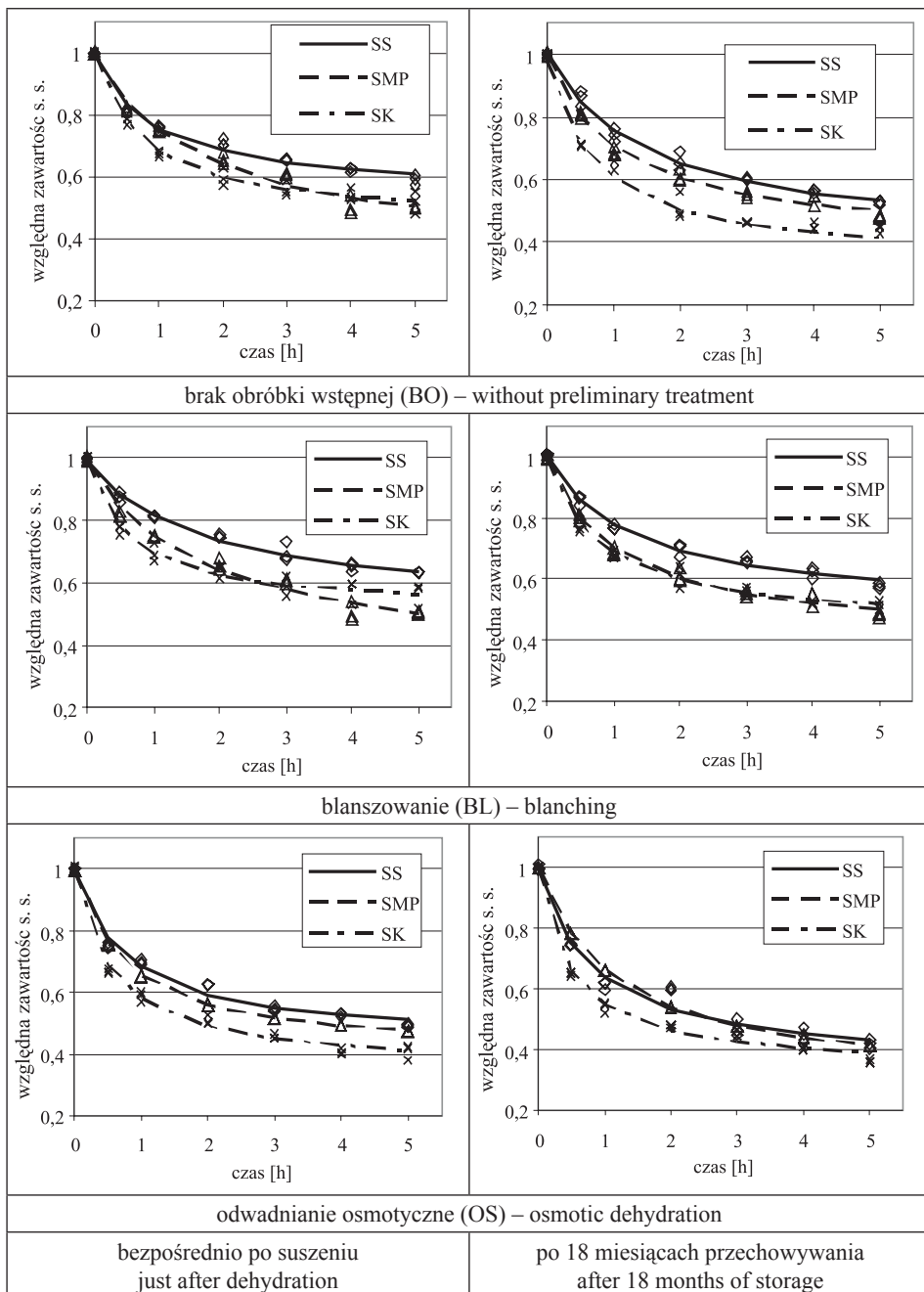
Wykresy zmian wartości poszczególnych wskaźników charakteryzujących przebieg procesu ponownego uwadniania suszy zaprezentowano na przykładzie pietruszki, ponieważ zależności dla pozostałych warzyw są podobne. Komplet danych eksperymentalnych przedstawiono w formie tabel Z13–Z15, w których umieszczono również część badań wcześniej opublikowanych [Stępień 2007b, 2008b].

Gdyby proces suszenia powodował nieznaczne zmiany składu chemicznego oraz struktury odwadnianego materiału, wówczas w trakcie rehydracji ilość suchej substancji dyfundującej do wody powinna być zbliżona do ilości substancji przedostającej się do roztworu w trakcie moczenia surowca. Rzeczywiste warunki suszenia materiałów biologicznych powodują wielokrotne zwiększenie ubytków rozpuszczalnych składników suchej substancji w trakcie ponownego uwadniania w stosunku do ubytków występujących podczas moczenia. Suszenie sublimacyjne pozwala uzyskiwać produkt charakteryzujący się najniższymi ubytkami suchej substancji w trakcie uwadniania (rys. 42). Najmniej istotny wpływ metody suszenia na ilość rozpuszczalnych składników suchej substancji przedostających się do rehydrującego roztworu obserwuje się dla warzyw wstępnie odwodnionych osmotycznie. Jednocześnie zabieg odwadniania osmotycznego powoduje

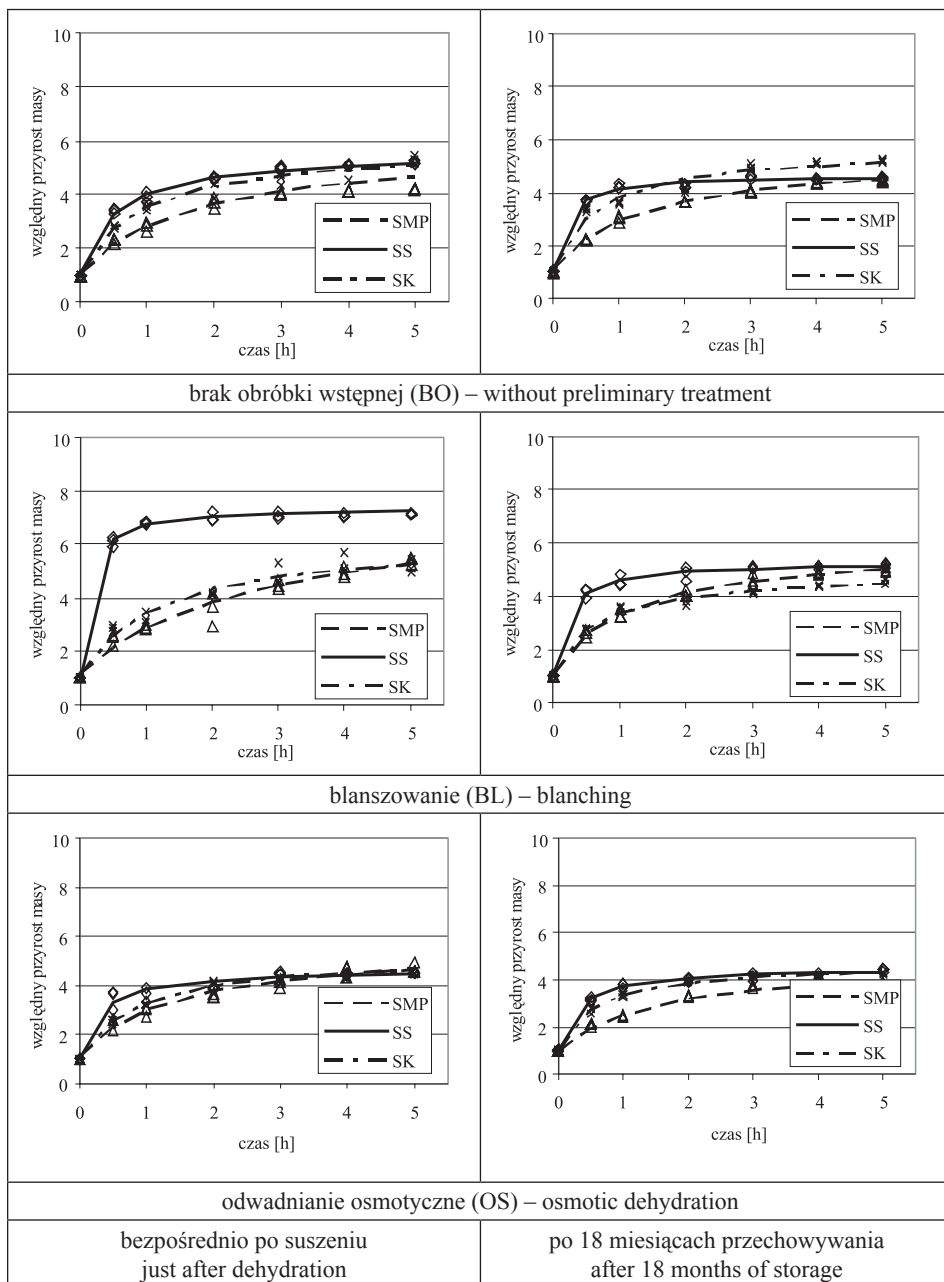
spadek zdolności materiałów do zachowania suchej substancji w trakcie uwadniania, niezależnie od gatunku warzywa i metody suszenia. Jest to spowodowane tym, że rejestrowane ubytki są sumą ubytków organicznych składników tkanki warzyw oraz substancji osmoaktywnej, która wniknęła do struktury materiału podczas zabiegu wstępnego. Analiza wartości równowagowych (tab. Z13–Z15) pozwala stwierdzić, że najmniej podatne na dyfuzję rozpuszczalnych składników suchej substancji są produkty wstępnie blanszowane, ponieważ już w trakcie samego zabiegu wstępnego część suchej substancji dyfunduje do roztworu. Z tego powodu w trakcie ponownego uwadniania suszy ubytki są najniższe. Okres przechowywania suszy wpływa w nieznacznym stopniu na ilość suchej substancji dyfundującej do roztworu w trakcie rehydracji, z niewielką tendencją wzrostową ilości dyfundującej substancji (rys. 42).

Największymi względnymi przyrostami masy w trakcie rehydracji charakteryzują się warzywa blanszowane przed suszeniem. W zależności od metody suszenia masa selera wzrasta od 7,5 do 8,5 razy, masa marchwi rośnie 6–7 razy, a pietruszki 5–7 razy. W zdecydowanej większości przypadków, w ramach danej obróbki wstępnej, masa próbki po pięciu godzinach rehydracji nie zależy od metody suszenia. Wyjątek stanowi pietruszka blanszowana, której próbki uzyskane metodą sublimacyjną po założonym czasie rehydracji zwiększają swoją masę około 7-krotnie (rys. 43). Natomiast próbki uzyskane z surowców odwodnionych osmotycznie lub niepoddanych obróbce wstępnej zwiększają swoją masę jedynie 5-krotnie w stosunku do masy materiału wyjściowego. Większe różnice pomiędzy badanymi technikami suszenia występują w kinetyce przebiegu procesu rehydracji. Produkty uzyskane w wyniku suszenia sublimacyjnego wchłaniają wodę intensywnie, szczególnie w pierwszej fazie uwadniania, kiedy uzyskują masę odpowiadającą ponad 90% masy końcowej. Lepsze właściwości rehydracyjne suszy uzyskanych metodą mikrofalowo-podciśnieniową, w stosunku do suszy konwekcyjnych, potwierdzają badania Giriego i Prasada [2007] oraz Marabiego i in. [2006]. Najintensywniej przyrasta masa rehydrowanych próbek uzyskanych z surowca blanszowanego przed suszeniem, a najniższe przyrosty masy obserwowane są dla produktów pochodzących z surowców wstępnie odwodnionych osmotycznie.

Analizując wartości równowagowe oraz dokładność ich wyznaczenia, należy stwierdzić, że w ramach danej metody suszenia najwyższymi potencjalnymi możliwościami przyrostu masy próbek w trakcie ponownego uwadniania charakteryzuje się produkty blanszowane przed suszeniem. Najwolniej przyrasta masa próbek odwodnionych osmotycznie i tylko nieco szybciej wzrasta masa uwadnianego materiału niepoddanego zabiegom wstępnym. Susze uzyskane metodą sublimacyjną wchłaniają wodę intensywnie, ale przy założeniu nieskończenie długiego czasu uwadniania ich potencjalne możliwości przyrostu masy są najniższe spośród badanych metod suszenia. 18-miesięczny okres przechowywania suszy w niewielkim stopniu obniża możliwości przyrostu masy próbek w trakcie ponownego uwadniania.

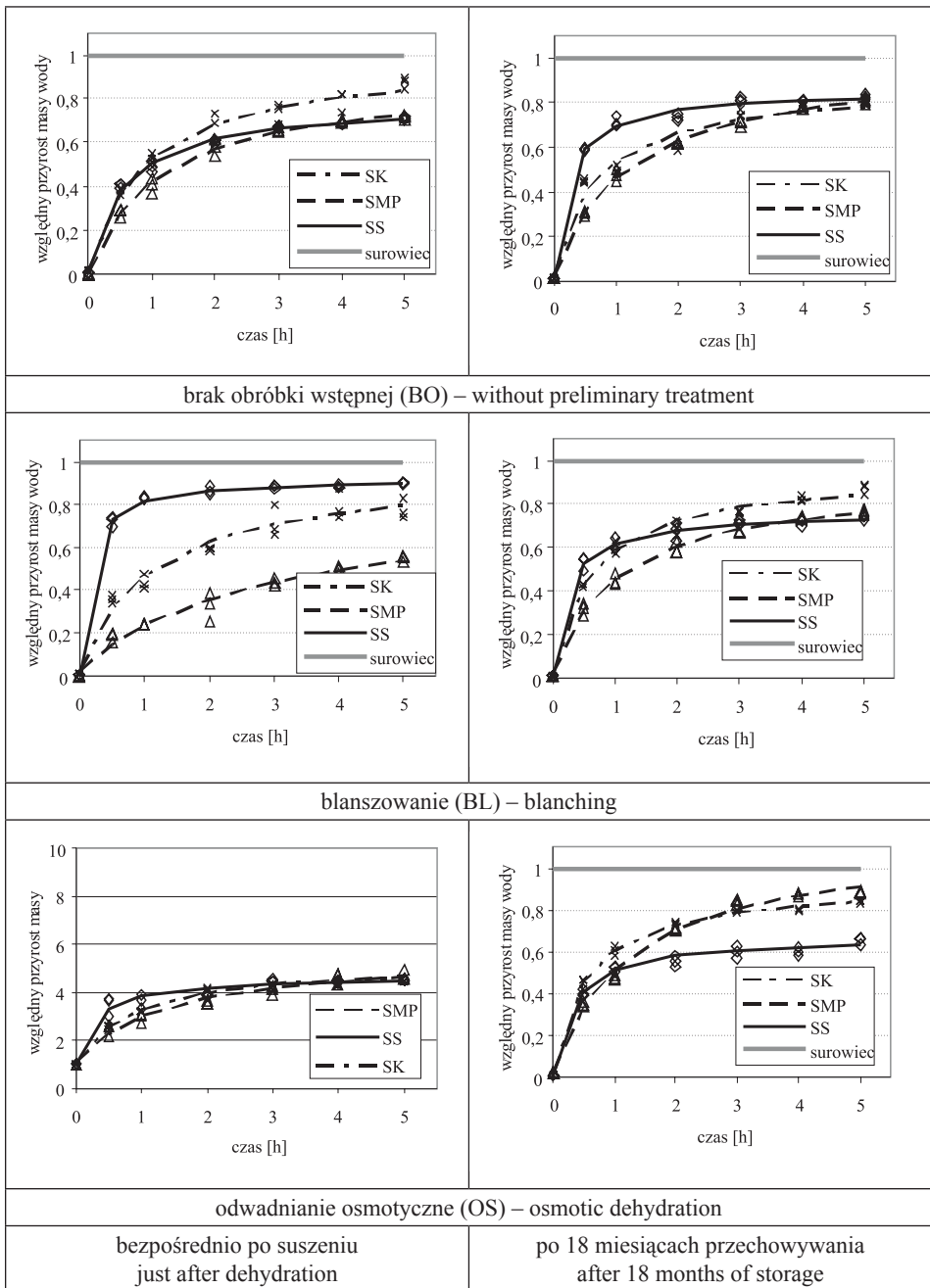


Rys. 42. Ubytki suchej substancji w suszu z pietruszki w trakcie rehydracji
 Fig. 42. Relative loss of dry matter mass during parsley rehydrating



Rys. 43. Przyrost masy próbki w trakcie rehydracji pietruszki
 Fig. 43. Relative gain of sample mass during parsley rehydrating

Jeśli masa wody w materiale po rehydracji osiągnęłaby poziom równy początkowej zawartości wody przed suszeniem, oznaczałoby to, że odwadnianie nie spowodowało żadnych zmian w strukturze biopolimerów, przez co nie zmieniła się zdolność produktu do wchłaniania i utrzymywania wody. W rzeczywistości zawsze mamy do czynienia z pewnym zakresem destrukcji struktury wewnętrznej, a ilość wody wchłanianej i utrzymywanej w materiale po rehydracji jest miarą stopnia tych zmian. Na rysunku 44 przyrosty masy wody w trakcie uwadniania pietruszki odniesiono do masy wody w surowcu. W trakcie pięciogodzinnej rehydracji żaden z badanych materiałów nie osiągnął zawartości wody surowca. Wiele badań wskazuje, że suszenie sublimacyjne jest metodą, która prowadzi do uzyskania suszy intensywnie wchłaniającej wodę podczas rehydracji, szczególnie w trakcie pierwszej fazy uwadniania [Kramkowski i in. 2001, Rahman i in. 2002, Stępień 2007b, 2008b]. Natomiast odwadnianie osmotyczne jest zabiegiem, który powoduje obniżenie zdolności suszu do wchłaniania wody, przy jednocześnie niniejszej dyfuzji składników suchej substancji do roztworu [Nayak i in. 2006]. Najwięcej wody, stanowiącej nawet ponad 80% jej początkowej masy, wnika do tkanki warzyw blanszowanych przed suszeniem. Z tego powodu próbki wstępnie blanszowane charakteryzowały się najwyższymi przyrostami masy wody. Pietruszka odwodniona osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym, w ciągu pięciogodzinnej rehydracji, absorbuje jedynie około 50% zawartości wody surowca. Technika odwadniania najistotniej wpływa na ilość wody wchłanianej przez susz pietruszki (szczególnie dla materiału pochodzącego z surowca blanszowanego lub odwodnionego osmotycznie). Przechowywanie suszy z marchwi i selera przez 18 miesięcy nie zmienia zdolności materiału do wchłaniania wody podczas ponownego uwadniania. Pietruszka suszona mikrofalowo, przechowywana w warunkach próżniowych, charakteryzuje się prawie 10% wzrostem ilości wchłanianej wody w stosunku do ilości wody absorbowanej przez susz badany bezpośrednio po suszeniu. Największą potencjalną zdolnością do wchłaniania wody charakteryzuje się susz uzyskany konwekcyjnie, szczególnie dla marchwi i pietruszki. Rehydracja suszy pochodzenia konwekcyjnego nie powoduje pęknięć struktury, tak jak to ma miejsce w materiałach uzyskanych metodami sublimacyjną lub mikrofalową, przez co rośnie zdolność materiału do utrzymania wody wewnątrz komórek. Zależność tę wykazano w niniejszej rozprawie podczas analizy struktury wewnętrznej (rozdział 5.5).



Rys. 44. Przyrost masy wody w trakcie rehydracji pietruszki
 Fig. 44. Relative gain of water mass during parsley rehydrating

5.5. Analiza struktury wewnętrznej

Roślinna ściana komórkowa jest nie tylko mechaniczną podporą struktury tkankowej osłaniającą protoplast, ale również stanowi obszar aktywności metabolicznej o istotnym znaczeniu dla prawidłowego funkcjonowania komórki. Elementy ścian komórkowych są łączone wiązaniami kowalencyjnymi lub wodorowymi i stabilizowane oddziaływaniami jonowymi. Wytrzymałość mechaniczna ścian komórkowych jest związana z obecnością nierozciągliwych mikrofibril celulozowych. Do przestrzeni między-micelarnej ścian komórkowych mogą wnikać różnego rodzaju związki mineralne, np. podczas odwadniania osmotycznego. Szacuje się, że udział struktury ścian komórkowych w wytrzymałości komórki wynosi 70% [Becker i in. 2003]. Podczas różnego typu procesów technologicznych na warzywa oddziałują czynniki zewnętrzne zmieniające strukturę komórkową, co przejawia się np. zmianą grubości ścian komórkowych. Najważniejsze z nich to: temperatura (podczas suszenia lub blanszowania), stres osmotyczny (podczas odwadniania osmotycznego w roztworach NaCl) czy zamrażanie (podczas przygotowania surowca do suszenia sublimacyjnego).

Przedstawiona w niniejszej rozprawie analiza struktury wewnętrznej suszy i materiałów ponownie uwodnionych miała na celu pomoc w interpretacji zmian cech mechanicznych i reologicznych suszonych warzyw. Potraktowanie tkanki roślinnej jako zespołu pojedynczych komórek otoczonych lepko-sprężystą ścianą komórkową pozwala na podjęcie próby wyjaśniania zjawisk zachodzących w materiałach o strukturze komórkowej, poddanych oddziaływaniu sił zewnętrznych [Jakubczyk i Lewicki 2003]. Przyjęto więc, że najbardziej przydatne do tego celu będą wskaźniki opisujące kształt komórki i stan ścian komórkowych. Przydatność wskaźników liniowych opisujących komórkę roślinną wykazała Łapczyńska-Kordon [2005], analizując zmiany długości i szerokości komórek podczas suszenia konwekcyjnego pietruszki. W niniejszej rozprawie nie analizowano rozkładu pól powierzchni komórek, a ograniczono się do opisowego przedstawienia zmian widocznych na przykładowych zdjęciach. Istotność różnic analizowanych wskaźników oszacowano w oparciu o rozłączność obszarów ufności. Jednakże, dla przejrzystości wykresów, na rysunkach 45–47 zamieszczono tylko dane eksperymentalne, które są wartościami średnimi z kilkudziesięciu pomiarów.

Obliczenia wstępne poszczególnych wskaźników wykazały, że w trakcie przechowywania suszy następują niewielkie zmiany w obrębie struktury komórkowej. Grubość, stopień odkształceń ścian oraz zmiany kształtu komórek zależą głównie od metody suszenia, ale również od stosowanych zabiegów wstępnych. Jako przykładowe zaprezentowano zdjęcia mikroskopowe wykonane bezpośrednio po suszeniu (fot. 3–5). Powiększenie obrazu na wszystkich zdjęciach jest jednakowe i wynosi x700.

Dla wszystkich warzyw stwierdzono istotne zmiany w strukturze komórkowej produktów, zarówno w formie suszy, jak i w formie materiałów uwodnionych, w stosunku do budowy komórkowej surowców. Proces suszenia jest głównie odpowiedzialny za zmiany w strukturze komórkowej produktów, ale ze względu na skurec błon i ścian zmiany te nie są wyraźnie widoczne na zdjęciach suszy. Dopiero po uwodnieniu, na skutek pęcznienia tkanki i wypływu składników suchej substancji, zmiany struktury pojawiają się

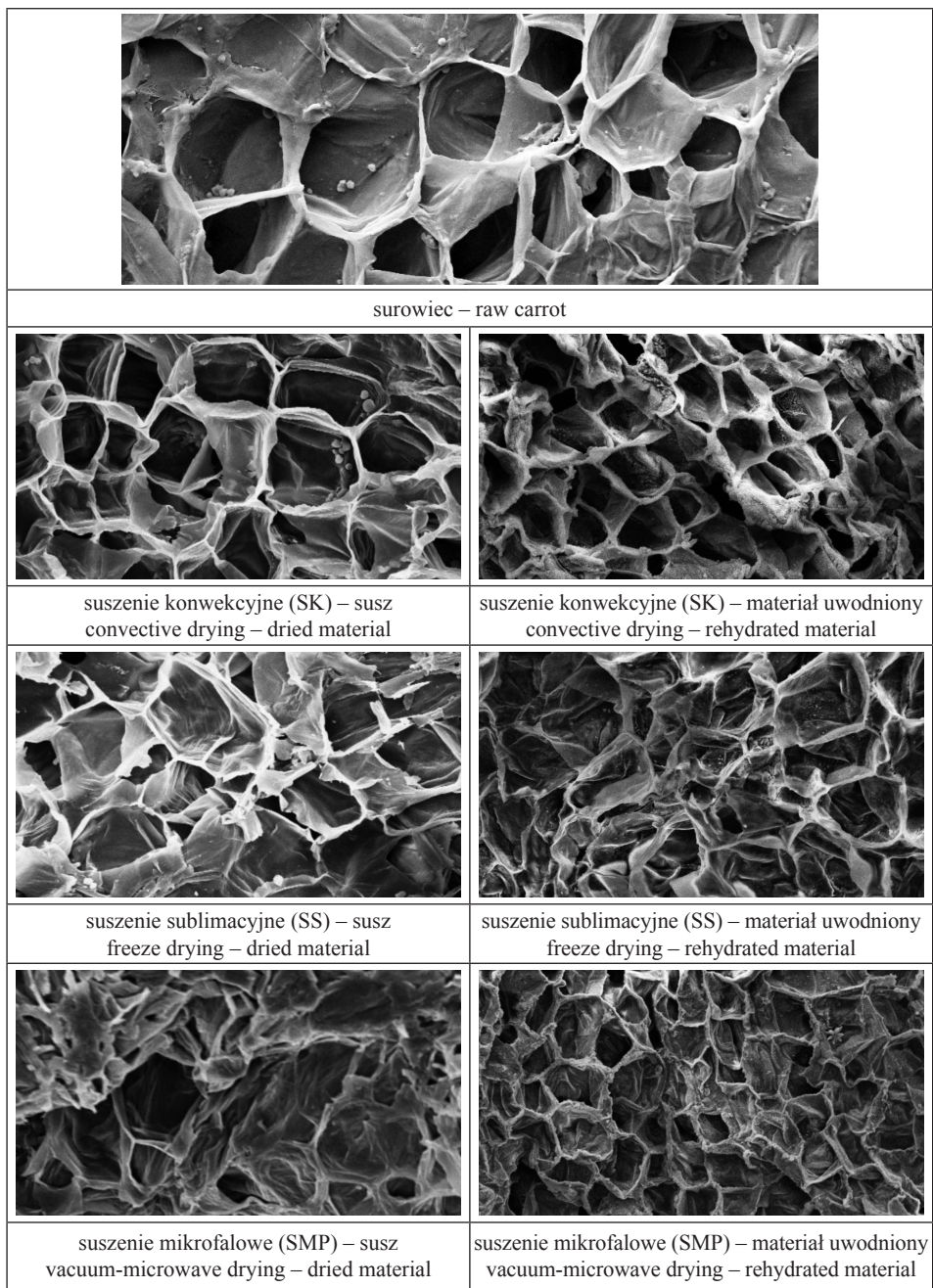
na obrazach mikroskopowych, np. w formie pęknięć. Dlatego na zdjęciach mikroskopowych obserwuje się zespoły komórek o ścianach mocno odkształconych, z licznymi pęknięciami, niż to ma miejsce w przypadku suszy. Jest to szczególnie wyraźnie widoczne dla marchwi (fot. 3). Odwrotna sytuacja jest dla selera, ale wynika to z faktu, iż komórki surowca są duże, mocno uwodnione, o bardzo cienkich ścianach (rys. 45). Proces suszenia powoduje załamanie delikatnego szkieletu komórkowego, co na zdjęciach mikroskopowych jest widoczne jako zespoły komórek o nieokreślonym kształcie i mało widocznych granicach (fot. 5).

Ściany komórkowe suszy otrzymanych metodą sublimacyjną są cienkie, postrzępione, z widocznymi ubytkami. Jednakże tworzą komórki o wielkości i kształcie zbliżonym do surowca. Rehydracja powoduje wielomiejscowe pęknięcia ścian komórkowych prowadzące do zacierania się granic pomiędzy sąsiednimi komórkami. Jest to związane prawdopodobnie z tworzeniem się dużych kryształków lodu podczas zamrażania surowca przed suszeniem sublimacyjnym, które uszkadzają strukturę ścian.

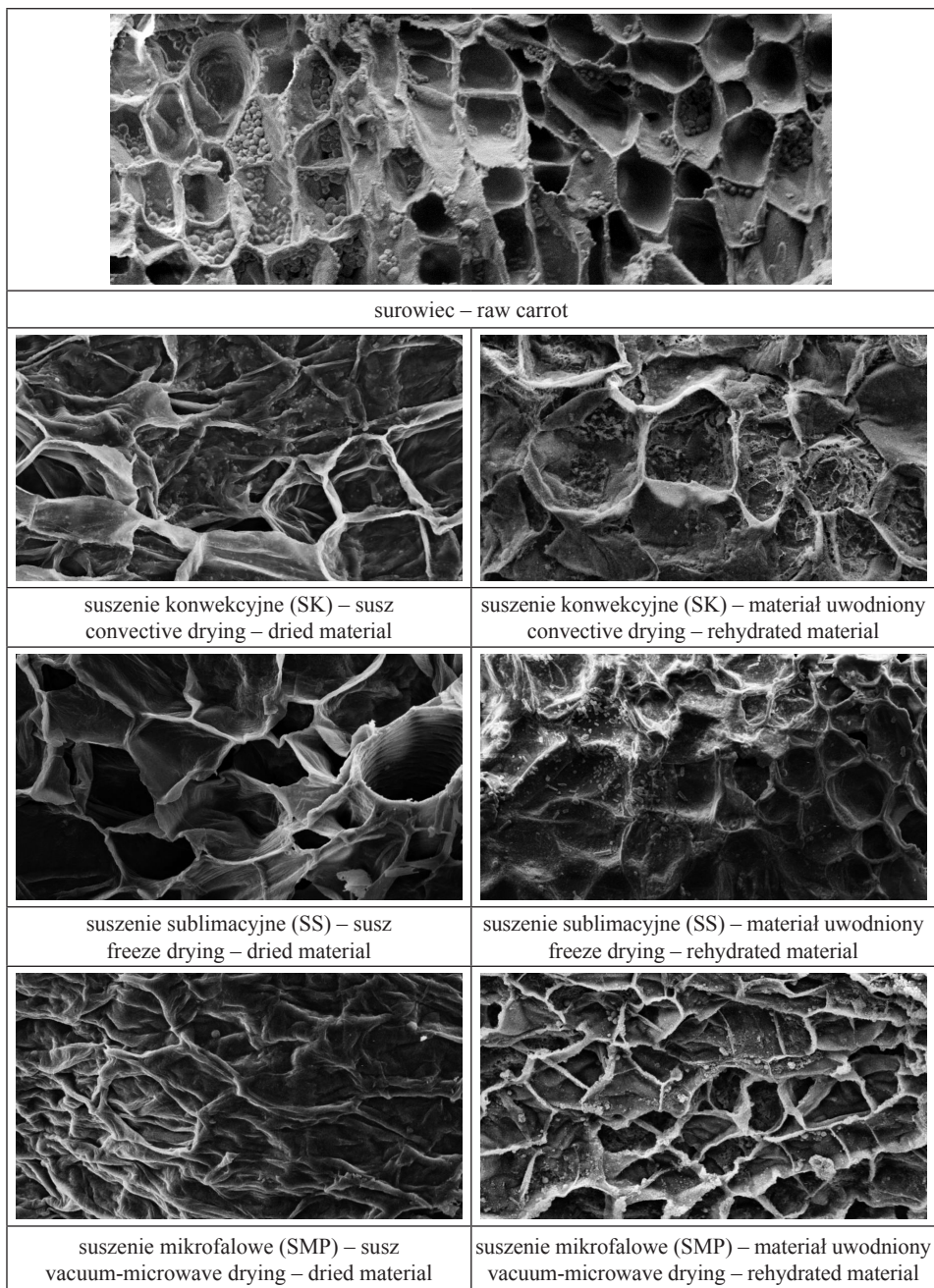
Na rysunku 45 przedstawiono zmiany grubości ścian komórkowych w suszach i materiałach uwodnionych poszczególnych warzyw oraz średnią grubość ścian surowców. Poszczególne wersje doświadczeń zostały na wykresach opisane w formie kodu. Na przykład kod OS-SMP-0 oznacza: surowiec odwodniony osmotycznie (OS), materiał suszony mikrofalowo (SMP), badania wykonane bezpośrednio po suszeniu (0). Wstępne obliczenia wykazały, że dla selera nie występują istotne statystycznie różnice w wartościach analizowanych wskaźników w zależności od czasu przechowywania suszy. Z tego powodu wszystkie pomiary wykonane dla selera przedstawiono bez uwzględnienia czasu przechowywania produktu. Ponadto, w niektórych przypadkach dla selera i pietruszki nie było możliwe wykonanie wiarygodnych odczytów poszczególnych parametrów, co spowodowało wystąpienie braku danych również na wykresach.

Najmniejszymi zmianami grubości ścian komórkowych w stosunku do surowca charakteryzuje się marchew. Uwodnienie suszy z marchwi i pietruszki po 18-miesięcznym okresie przechowywania prowadzi do uzyskania materiału o cieńszych ścianach komórkowych, niż ma to miejsce w produktach uwodnionych bezpośrednio po suszeniu. Może być to związane z migracją wilgoci wewnątrz matriks ścian komórkowych magazynowanych suszy. Najmniejszą średnią grubością charakteryzują się ściany komórkowe suszu z marchwi blanszowanej przed suszeniem sublimacyjnym, przechowywanej przez 18 miesięcy (około 1,3 μm), a najgrubsze ściany ma marchew odwodniona osmotycznie przed suszeniem sublimacyjnym, przechowywana przez 18 miesięcy (około 4 μm). Uwodnione produkty suszenia konwekcyjnego charakteryzują się grubszymi ścianami komórkowymi w stosunku do pozostałych badanych metod odwadniania.

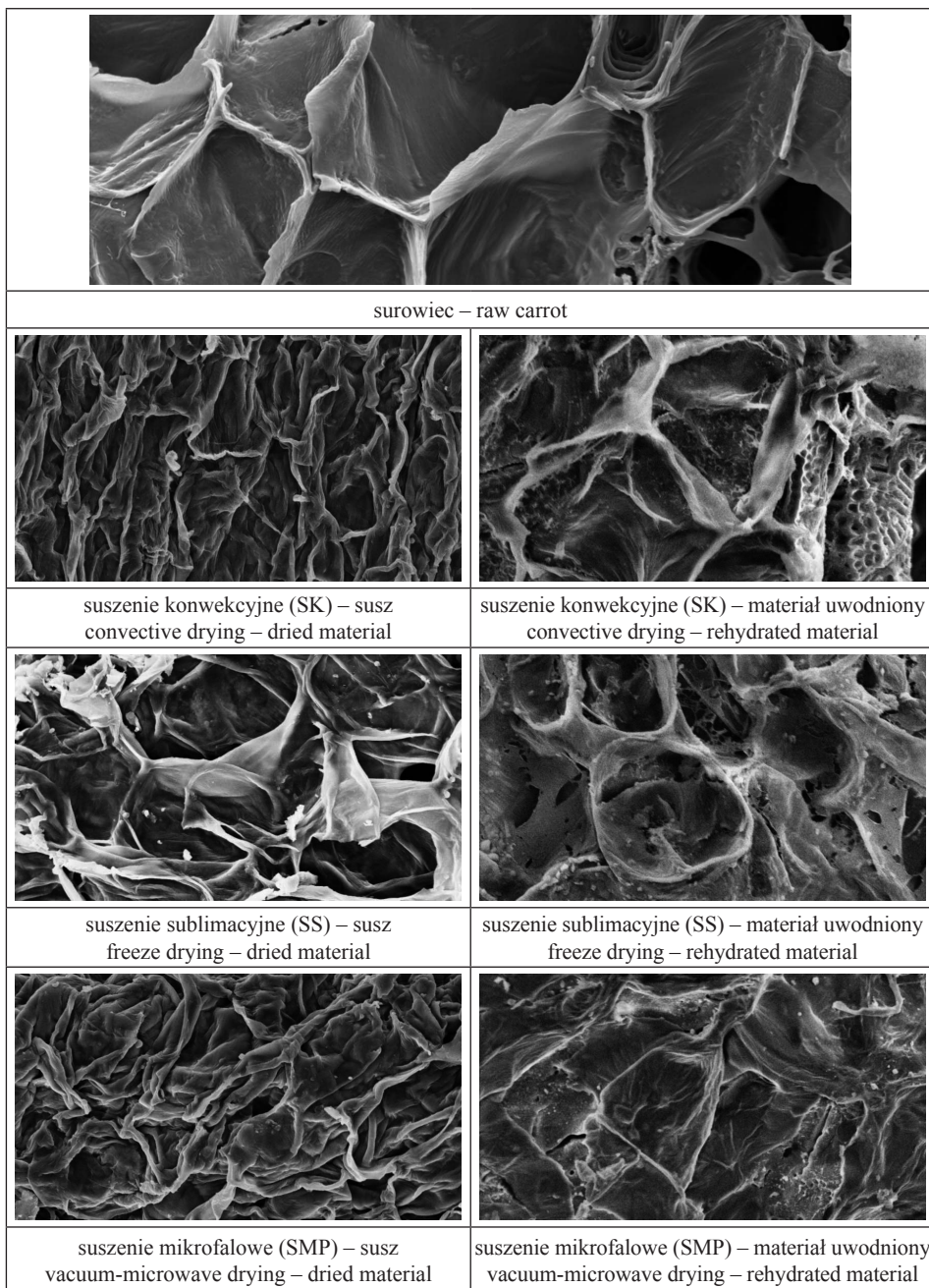
Pietruszka uwodniona bezpośrednio po suszeniu sublimacyjnym i uzyskana z surowca odwodnionego osmotycznie ma ściany komórkowe o grubości mniejszej niż grubość ścian surowca. Istotność wpływu odwadniania osmotycznego na strukturę tkanki roślinnej potwierdzają badania Lewickiego i Porzeckiej-Pawlak [2005] oraz Kowalskiej i Lenarta [2005]. Pietruszka blanszowana przed suszeniem konwekcyjnym lub przed suszeniem mikrofalowym i uwodniona bezpośrednio po suszeniu charakteryzuje się komórkami o istotnie pogrubionych ścianach.



Fot. 3. Zdjęcia mikrostruktury marchwi niepoddanej obróbce wstępnej przed suszeniem
 Phot. 3. Microstructure photographs for carrot not subjected to preliminary treatment



Fot. 4. Zdjęcia mikroskopowe pietruszki blanszowanej przed suszeniem
Phot. 4. Microstructure photographs for parsley blanched before drying

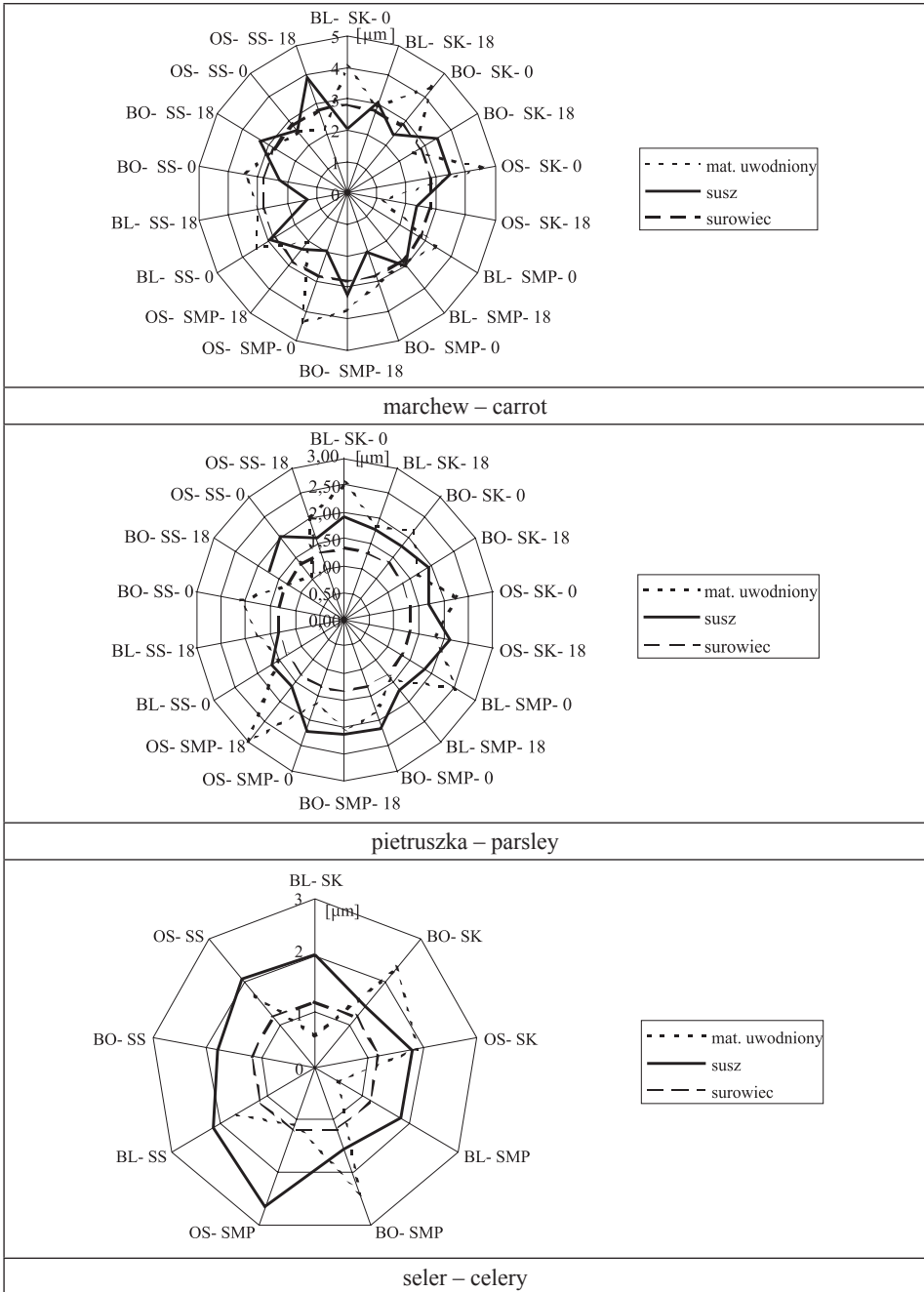


Fot. 5. Zdjęcia mikroskopowe selera odwodnionego osmotycznie przed suszeniem
Phot. 5. Microstructure photographs for celery osmotically dehydrated before drying

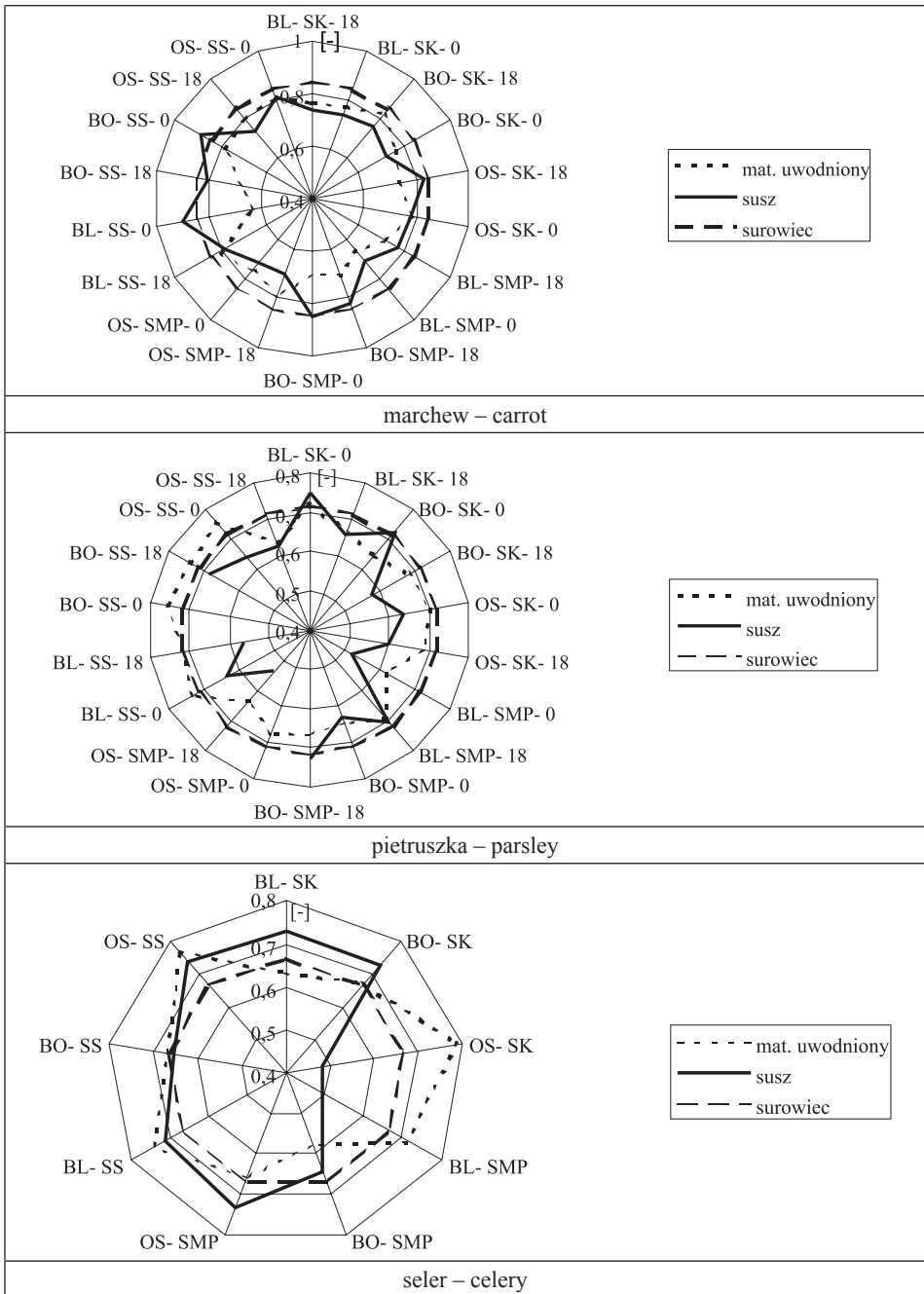
Blanszowanie selera przed suszeniem konwekcyjnym i mikrofalowym powoduje uzyskanie materiału uwodnionego o wyraźnie cieńszych ścianach komórkowych. Oznacza to, że wpływ obróbki wstępnej na stan ścian komórkowych jest charakterystyczny dla danego gatunku warzywa. We wszystkich przypadkach ściany komórkowe suszy z pietruszki i selera cechują się większą grubością w stosunku do surowców.

Marchew i pietruszka poddane obróbce wstępnej i suszone różnymi metodami charakteryzują się komórkami o istotnie większym stopniu pofałdowania niż surowce, co wyraża się niższą wartością *kolistości*. Wartość wskaźnika dla selera suszonego sublimacyjnie lub konwekcyjnie wzrasta w stosunku do surowca, co mogłoby oznaczać, że ściany komórkowe zarówno suszu, jak i materiału uwodnionego są mniej zniekształcone (rys. 46). Jednakże dokładniejsza analiza zdjęć pozwala stwierdzić, że w wielu przypadkach program komputerowy, analizujący zdjęcia mikroskopowe selera suszonego sublimacyjnie lub konwekcyjnie, połączone komórki traktował jako jeden obiekt. Wynika z tego wniosek, że prawdopodobnie ściany komórkowe selera są mniej odporne na zmiany zachodzące w odwadnianym materiale. Wśród suszy największym pofałdowaniem charakteryzują się komórki marchwi odwodnionej osmotycznie przed suszeniem mikrofalowym i przechowywanej przez okres 18 miesięcy, pietruszki blanszowanej przed suszeniem sublimacyjnym i badanej bezpośrednio po suszeniu oraz selera odwodnionego osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym. Spośród materiałów uwodnionych najniższą wartością wskaźnika charakteryzuje się marchew blanszowana przed suszeniem sublimacyjnym i badana bezpośrednio po odwodnieniu, pietruszka blanszowana przed suszeniem mikrofalowym i badana bezpośrednio po suszeniu oraz seler blanszowany przed suszeniem konwekcyjnym. Oznacza to, że ściany komórkowe tych produktów są najbardziej odkształcone, więc i zmiany w obrębie struktury micelarnej również powinny być największe.

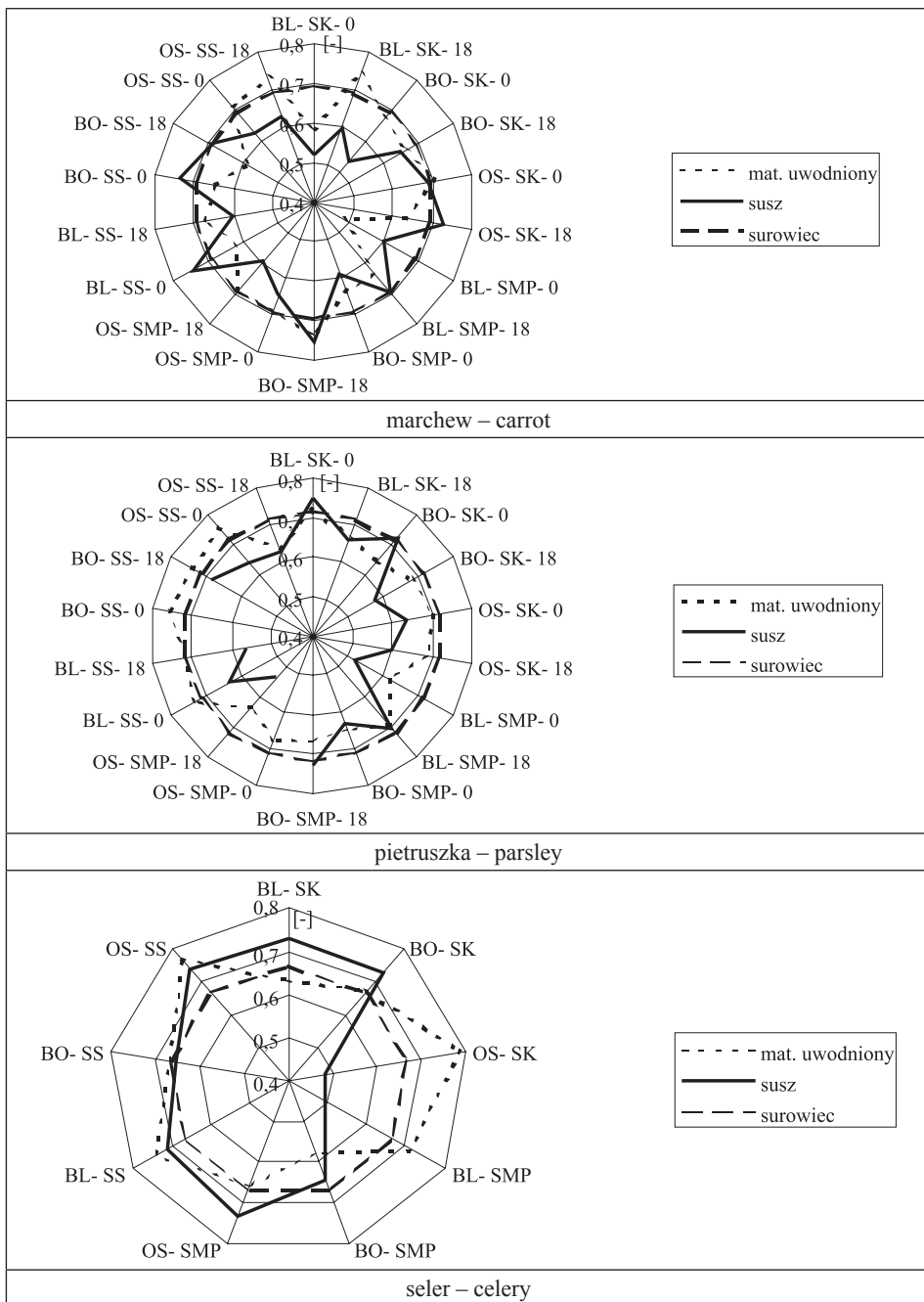
Wydłużenie komórek warzyw suszonych różnymi metodami zmienia się nieznacznie w stosunku do wydłużenia komórek surowców i tylko w nielicznych przypadkach różnice są istotne statystycznie. Komórki suszy marchwi blanszowanej przed suszeniem konwekcyjnym i marchwi odwodnionej osmotycznie przed suszeniem sublimacyjnym charakteryzują się istotnie mniejszą wartością *wydłużenia* niż surowiec. Spośród materiałów uwodnionych najbardziej wydłużony kształt mają komórki marchwi blanszowanej przed suszeniem mikrofalowym lub przed suszeniem konwekcyjnym, badane bezpośrednio po suszeniu. W większości przypadków susze z pietruszki charakteryzują się komórkami o bardziej wydłużonym kształcie niż komórki surowca, natomiast komórki materiału uwodnionego mają kształt zbliżony do kształtu komórek surowca. Oznacza to, że woda wchłaniana przez ściany komórkowe pozwala na częściowe odtworzenie pierwotnej struktury. Susz z selera odwodnionego osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym jest zbudowany z komórek o kształcie istotnie bardziej wydłużonym niż komórki surowca, natomiast po uwodnieniu kształt tych komórek jest najbardziej zbliżony do okręgu (rys. 47).



Rys. 45. Zmiany grubości ścian komórkowych
 Fig. 45. Cell wall thickness changes



Rys. 46. Zmiany kolistości komórek
 Fig. 46. Cell circularity changes



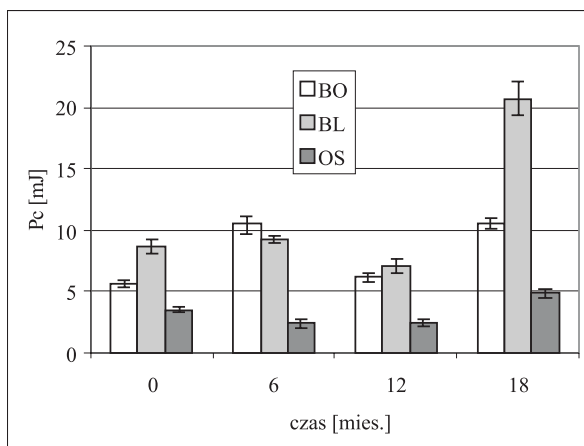
Rys. 47. Zmiany wydłużenia komórek
 Fig. 47. Cell elongation changes

5.6. Praca ściskania suszy warzywnych po ponownym uwodnieniu

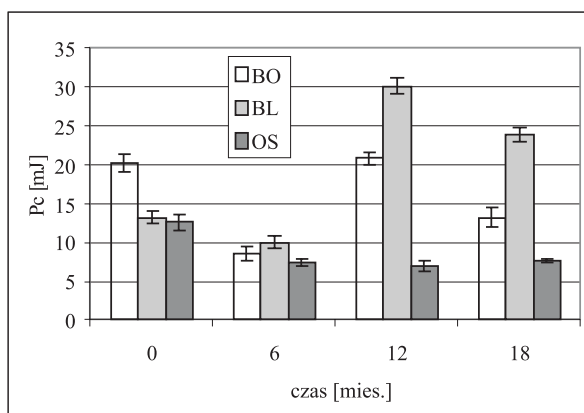
W oparciu o dane eksperymentalne zamieszczone w tabelach Z2, Z4 i Z6 na rysunkach 48–56 przedstawiono zmienność wartości pracy ściskania produktów po ponownym uwodnieniu w zależności od metody suszenia, obróbki wstępnej oraz czasu przechowywania suszy. Wszystkie susze uwodnione po suszeniu sublimacyjnym charakteryzują się podwyższoną odpornością na ściskanie w stosunku do materiałów uwodnionych po suszeniu konwekcyjnym lub mikrofalowym. Wydaje się to sprzeczne z wynikami badań Krokidy i in. [1999], którzy analizując odporność na ściskanie jabłek, bananów, marchwi i ziemniaków uwodnionych po suszeniu różnymi metodami, stwierdzili, że materiały uwodnione po suszeniu sublimacyjnym charakteryzują się najniższymi wartościami maksymalnych sił i naprężeń występujących w trakcie testów ściskania. Jednakże biorąc pod uwagę fakt, iż produkty te są jednocześnie najbardziej plastyczne, nakłady pracy w trakcie ściskania mogą być znacznie większe niż dla produktów uwodnionych po suszeniu konwekcyjnym lub mikrofalowym. Pietruszka uwodniona po suszeniu konwekcyjnym ma wyższą wytrzymałość na ściskanie niż produkt uwodniony po suszeniu mikrofalowym. W przypadku selera zależność jest odwrotna. Wynika z tego, że wpływ metody suszenia na wartość pracy ściskania materiału ponownie uwodnionego zależy od rodzaju warzywa, a więc od składu chemicznego i budowy komórkowej surowca. Elementy te decydują o przebiegu procesu rehydracji suszy, co wpływa na cechy produktu uzyskanego po uwodnieniu. Twardość marchwi, badana metodami sensorycznymi, jest wyższa dla materiału uwodnionego po suszeniu konwekcyjnym niż po suszeniu mikrofalowym [Marabi i in. 2006], co przełożyło się na niższą akceptowalność ogólną produktu.

Odwodnienie osmotyczne marchwi przed suszeniem konwekcyjnym lub sublimacyjnym powoduje, że susze po ponownym uwodnieniu wymagają niższych nakładów pracy w trakcie odkształcania niż materiały blanszowane lub niepoddane zabiegom wstępnym. Natomiast efekt blanszowania jest w większości przypadków odwrotny (rys. 48 i 49). Oba zabiegi wstępne wykonane przed suszeniem konwekcyjnym lub sublimacyjnym pietruszki prowadzą do uzyskania suszy, które po uwodnieniu mają obniżoną wytrzymałość na ściskanie (rys. 51 i 52). Lentas i Witrowa-Rajchert [2009] potwierdzają istotny wpływ blanszowania wykonanego przed suszeniem konwekcyjnym na odporność na ściskanie rehydrowanego suszu korzenia selera. Wykazały wpływ temperatury czynnika blanszującego na wartości pracy ściskania. Podwyższenie temperatury z 60 do 95°C istotnie obniża odporność mechaniczną ponownie uwodnionego selera.

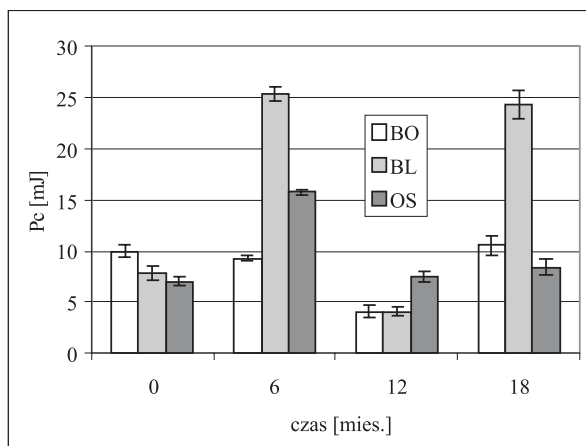
Najmniej istotny wpływ zabiegów wstępnych na odporność na ściskanie produktów po uwodnieniu zaobserwowano dla selera, niezależnie od zastosowanej techniki odwadniania (rys. 54–56).



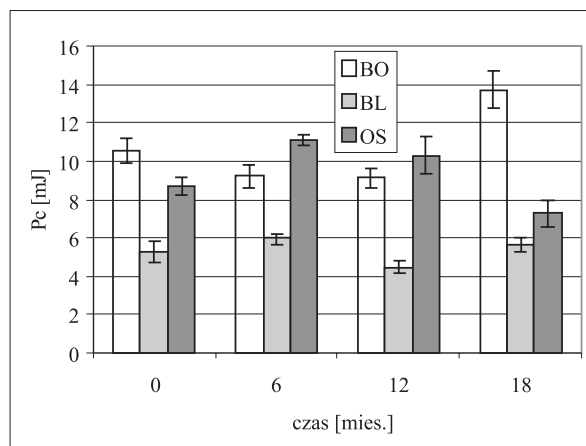
Rys. 48. Wartość pracy ścisania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 48. Compression work values for rehydrated carrot after convective drying



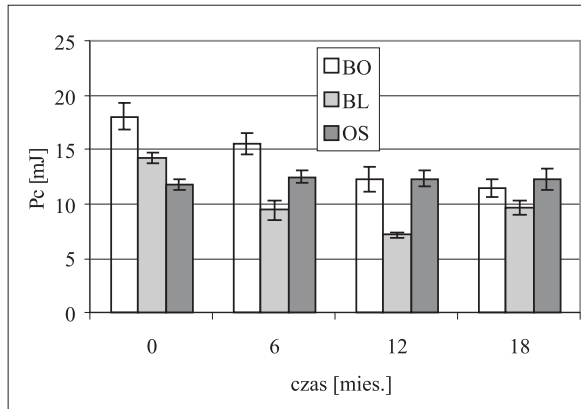
Rys. 49. Wartość pracy ścisania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 49. Compression work values for rehydrated carrot after freeze drying



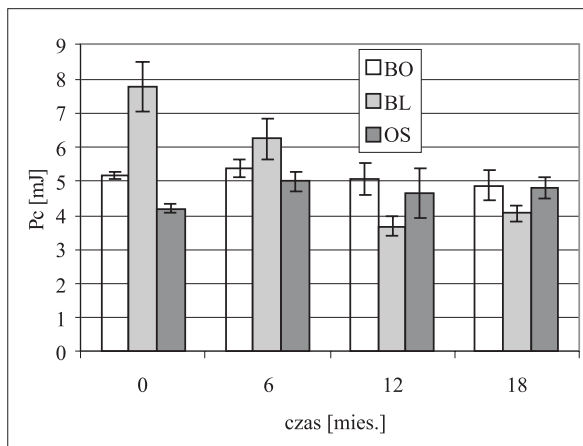
Rys. 50. Wartość pracy ściskania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 50. Compression work values for rehydrated carrot after vacuum-microwave drying



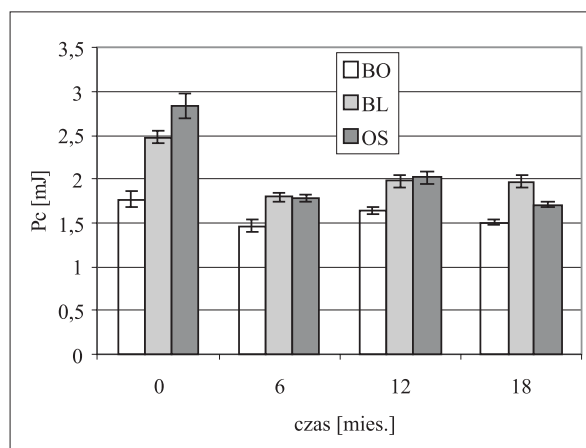
Rys. 51. Wartość pracy ściskania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 51. Compression work values for rehydrated parsley after convective drying



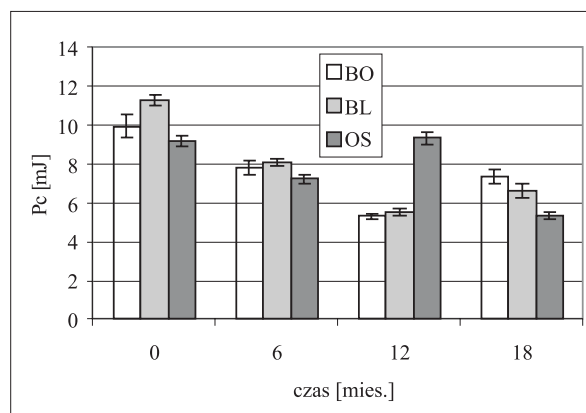
Rys. 52. Wartość pracy ściskania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 52. Compression work values for rehydrated parsley after freeze drying



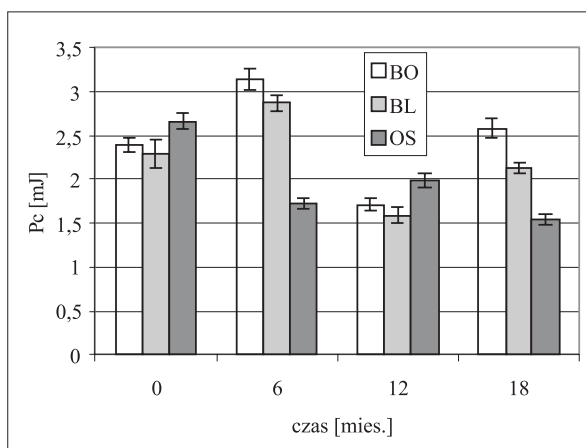
Rys. 53. Wartość pracy ściskania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 53. Compression work values for rehydrated parsley after vacuum-microwave drying



Rys. 54. Wartość pracy ściskania selera ponownie uwodnionego po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 54. Compression work values for rehydrated celery after convective drying



Rys. 55. Wartość pracy ściskania selera ponownie uwodnionego po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 55. Compression work values for rehydrated celery after freeze drying



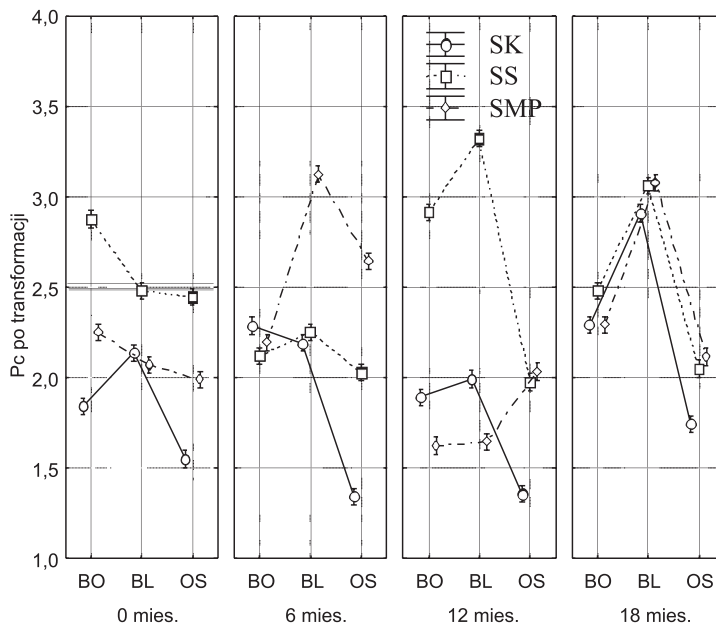
Rys. 56. Wartość pracy ściskania selera ponownie uwodnionego po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 56. Compression work values for rehydrated celery after vacuum-microwave drying

W trakcie przechowywania suszy odporność na ściskanie materiału po uwodnieniu utrzymuje się na stałym poziomie lub ulega niewielkiemu obniżeniu (rys. 52–55). Jedynie marchew blanszowana wykazuje wzrost odporności na ściskanie po kolejnych okresach przechowywania.

Podobnie jak to miało miejsce przy analizie wytrzymałości na ściskanie suszy, również odporność na ściskanie uwodnionej marchwi, pietruszki i selera zależy od wzajemnych interakcji pomiędzy poszczególnymi czynnikami. Wykonano więc wieloczynnikową analizę wariancji, która była podstawą dalszego wnioskowania.

Produkty uzyskane w wyniku suszenia warzyw różnymi metodami, po ponownym uwodnieniu do wilgotności zbliżonej do surowca, charakteryzują się mocno obniżoną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do wytrzymałości surowca. Wytrzymałość na ściskanie marchwi obniżyła się średnio 100-krotnie, przy około 30-krotnym spadku wytrzymałości pietruszki i około 20-krotnym spadku wytrzymałości na ściskanie selera. Susze warzywne ponownie uwodnione nigdy nie będą w stanie wchłonąć takiej ilości wody, jaką miał surowiec. Wynika to z faktu nieodwracalnego zniszczenia protoplastu, który jest żywym układem komórki i głównym magazynem wody. Tylko niewielka część wody zawarta jest w pektynach ścian komórkowych. Suszenie niszczy cytoplazmę wraz z zawartymi w niej organellami. Ponowne uwodnienie nie pozwala odtworzyć się błonom elementarnym, a składniki komórki: cytoplazma, jądro, mitochondria i plastydy nie odzyskują funkcji życiowych [Hall i in. 1982, Przestalski 1983, Woźny i in. 2001]. Naprężenia pojawiające się w ścianach komórkowych podczas suszenia powodują mikropęknięcia, które w trakcie uwadniania zmieniają się w duże nieciągłości struktury widoczne na zdjęciach mikroskopowych przedstawionych w rozdziale 5.5. Jest to przyczyną braku możliwości zatrzymania wewnątrz komórki tej wody, która została wchłonięta. **Powyższe fakty potwierdzają prawdziwość hipotezy roboczej H₁ sformułowanej w rozdziale 2.**

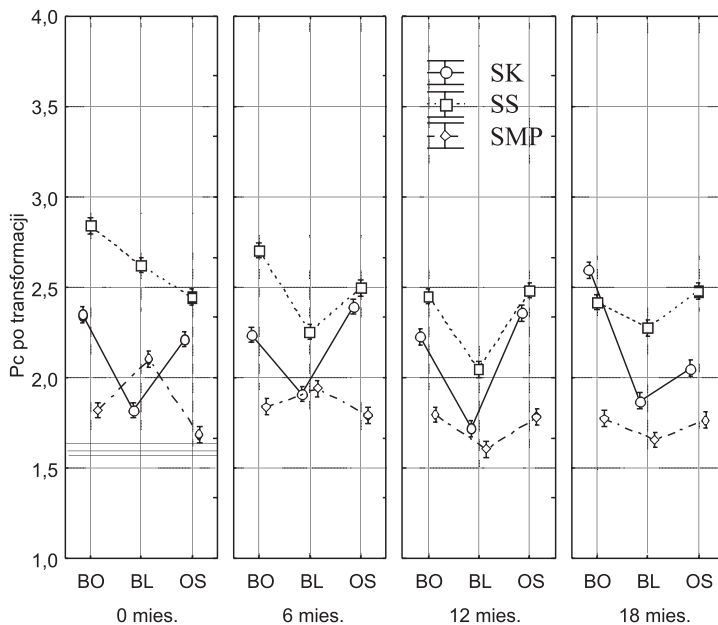
Możliwość modyfikacji odporności na ściskanie materiałów uwodnionych są znacznie mniejsze niż suszy. Największe różnice w wytrzymałości na ściskanie materiału najbardziej i najmniej odpornego są dla marchwi (3,32–1,34), mniejsze dla selera (3,48–1,21), a najmniejsze dla pietruszki (2,84–1,60), (rys. 57–59). Przytoczone wartości są przetransformowanymi danymi eksperymentalnymi dla przeprowadzenia analizy statystycznej.



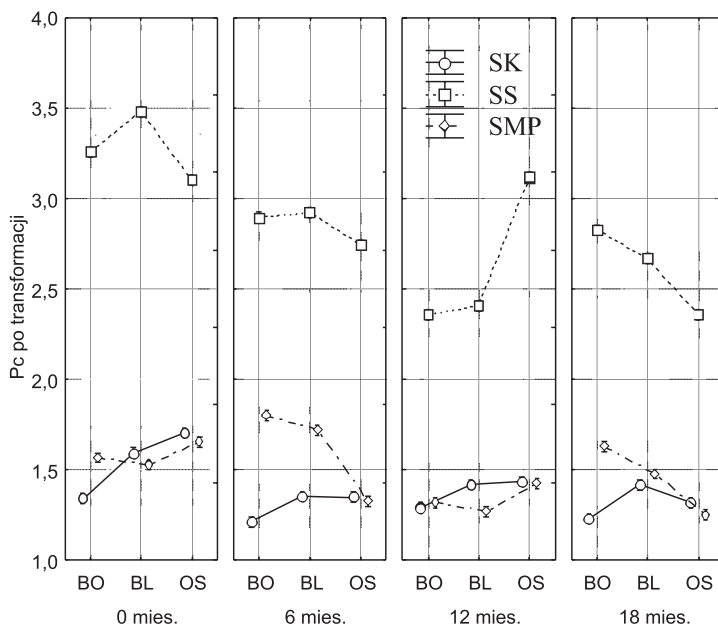
Rys. 57. Wytrzymałość na ściskanie suszu z marchwi po uwodnieniu
Fig. 57. Compressive strength of rehydrated carrot

Suszenie sublimacyjne jest metodą pozwalającą uzyskać produkt, który po uwodnieniu charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż uwodnione materiały otrzymane metodami konwekcyjną lub mikrofalową. W trakcie uwadniania suszy występuje niekorzystne zjawisko polegające na dyfuzji rozpuszczalnych składników suchej substancji do roztworu. Ubytki suchej substancji powodują obniżenie wytrzymałości na ściskanie. Metoda sublimacyjna pozwala uzyskać susz warzywny, który charakteryzuje się najniższymi ubytkami suchej substancji w trakcie uwadniania, co wykazano w rozdziale 5.4.

Stwierdzono istotność wpływu zabiegów wstępnych na wartości analizowanych cech dla materiałów uwodnionych. W przypadku marchwi blanszowanie surowca przed suszeniem, w większości przypadków, pozwoliło uzyskać produkt, który po uwodnieniu charakteryzował się wyższą wytrzymałością na ściskanie w stosunku do pozostałych zabiegów wstępnych (rys. 57). Wynika to z faktu, że w trakcie samego zabiegu wstępnego (blanszowania) część rozpuszczalnych składników suchej substancji została wypłukana, co przełożyło się na znacznie mniejsze ubytki suchej substancji w trakcie uwadniania. Zjawisko to zaobserwowano w trakcie badań rehydracji suszy, co przedstawiono w rozdziale 5.4.



Rys. 58. Wytrzymałość na ściskanie suszu z pietruszki po uwodnieniu
 Fig. 58. Compressive strength of rehydrated parsley



Rys. 59. Wytrzymałość na ściskanie suszu z selera po uwodnieniu
 Fig. 59. Compressive strength of rehydrated celery

Badania wytrzymałości na ściskanie uwodnionej pietruszki po założonych okresach przechowywania suszy wykazały, że w większości przypadków produkt uzyskany z surowca blanszowanego ma obniżoną wytrzymałość na ściskanie (rys. 58). Dla selera wpływ zabiegów wstępnych na analizowaną cechę jest najmniej istotny (rys. 59).

Wpływ czasu przechowywania suszy na wytrzymałość na ściskanie materiałów uwodnionych jest znacznie mniej istotny niż dla suszy. Wytrzymałość na ściskanie utrzymuje się na stałym poziomie lub ma niewielką tendencję spadkową.

Najwyższą odpornością na ściskanie charakteryzuje się marchew blanszowana, suszona sublimacyjnie i ponownie uwodniona, a najniższą marchew odwodniona osmotycznie przed suszeniem konwekcyjnym. Spośród materiałów uwodnionych uzyskanych z suszy z pietruszki najwyższą wytrzymałość na ściskanie ma materiał niepoddany zabiegom wstępnym przed suszeniem sublimacyjnym, a najniższą pietruszka blanszowana przed suszeniem mikrofalowym. Wszystkie produkty z selera uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się podwyższoną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do pozostałych dwóch metod suszenia.

5.7. Praca przecinania suszy warzywnych po ponownym uwodnieniu

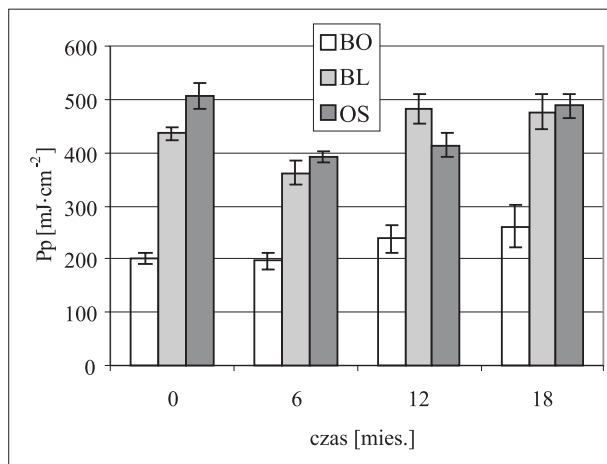
W większości przypadków uwodnione produkty uzyskane z suszy z marchwi mają podwyższoną wytrzymałość na przecinanie w stosunku do wytrzymałości surowca. Jedynie materiał pochodzący z marchwi blanszowanej przed suszeniem sublimacyjnym charakteryzuje się odpornością na przecinanie zbliżoną do surowca (ok. $184 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$). Uwodnione produkty pietruszki mają obniżoną wytrzymałość na przecinanie w stosunku do wytrzymałości surowca (ok. $386 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pietruszka blanszowana przed suszeniem konwekcyjnym po uwodnieniu cechuje się wytrzymałością na przecinanie najbardziej zbliżoną do wytrzymałości surowca. Wytrzymałość na przecinanie uwodnionych produktów z selera oscyluje wokół wartości odpowiadającej wytrzymałości surowca, która wynosi ok. $112 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$. Niewiele zmienioną wytrzymałość na przecinanie, a czasami wyższą dla materiałów ponownie uwodnionych w stosunku do wytrzymałości surowej tkanki, można tłumaczyć zmianami zachodzącymi w micelarnej strukturze ścian komórkowych podczas suszenia. Wiązki celulozowe ulegają deformacji, stawiając opór nożowi tnącemu, co powoduje duże nakłady pracy na przecięcie suszy. Uwodnienie rozluźnia strukturę ścian komórkowych, najczęściej powodując wzrost ich grubości (rozdział 5.5). Mimo to nakłady pracy potrzebne na przecięcie takiej struktury często są wyższe, niż to ma miejsce podczas przecinania pierwotnej struktury surowca. Zależność taką potwierdzają badania Szarycza i in. [2006], którzy wykazali, że przecięcie selera uwodnionego po suszeniu mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia wymaga o ponad 50% wyższych nakładów pracy w stosunku do surowca.

Korzystając z danych eksperymentalnych zamieszczonych w tabelach Z2, Z4 i Z6, przedstawiono zależności opisujące wpływ poszczególnych czynników na wartości pracy przecinania warzyw po ponownym uwodnieniu (rys. 60–68).

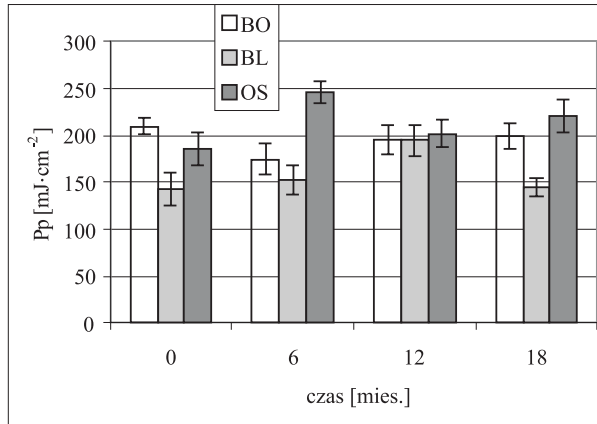
Suszenie konwekcyjne warzyw sprawia, że produkty po uwodnieniu charakteryzują się podwyższoną odpornością na przecinanie w stosunku do materiałów uwodnionych po suszeniu sublimacyjnym lub mikrofalowym. Najniższe nakłady pracy na przecięcie marchwi uwodnionej występują dla produktów uzyskanych metodą sublimacyjną i są o około 50% niższe niż wartości pracy przecinania marchwi uwodnionej po suszeniu mikrofalowym (rys. 60–62). Nie zaobserwowano istotnych różnic w odporności na przecinanie pomiędzy pietruszką uwodnioną po suszeniu sublimacyjnym i mikrofalowym (rys. 64–65). Seler niepoddany zabiegom wstępnym lub blanszowany przed suszeniem mikrofalowym charakteryzuje się istotnie wyższymi wartościami pracy przecinania w stosunku do materiałów pochodzących z suszenia sublimacyjnego.

Nawirska i in. [2009], przecinając surowe plastry dyni, wiążą występowanie niższych wartości maksymalnych sił cięcia ze wzrostem wilgotności surowca. Można tym tłumaczyć mniejsze wartości pracy przecinania uwodnionego selera, którego wilgotność była najwyższa.

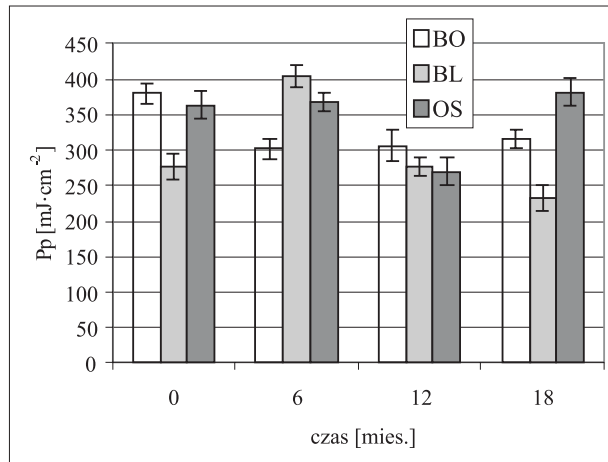
Stwierdzono istotny wpływ zabiegów wstępnych na wartości pracy przecinania warzyw ponownie uwodnionych w stosunku do wytrzymałości na przecinanie produktów pochodzących z warzyw nie poddanych zabiegom wstępnym, **co potwierdza hipotezę H₃ sformułowaną w rozdziale 2**. Zabiegi wstępne wykonane przed suszeniem konwekcyjnym podwyższają odporność na przecinanie wszystkich badanych warzyw. Odwodnienie osmotyczne surowców przed suszeniem sublimacyjnym powoduje wzrost wartości pracy przecinania lub, jak w nielicznych przypadkach, utrzymanie na poziomie zbliżonym do wartości odpowiadających materiałom niepoddanym zabiegom wstępnym.



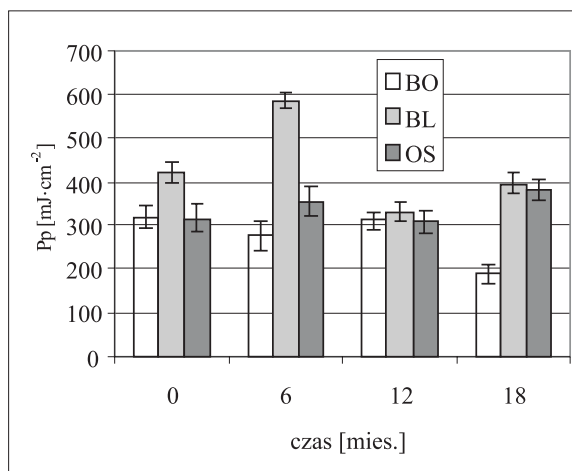
Rys. 60. Wartość pracy przecinania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 60. Cutting work values for rehydrated carrot after convective drying



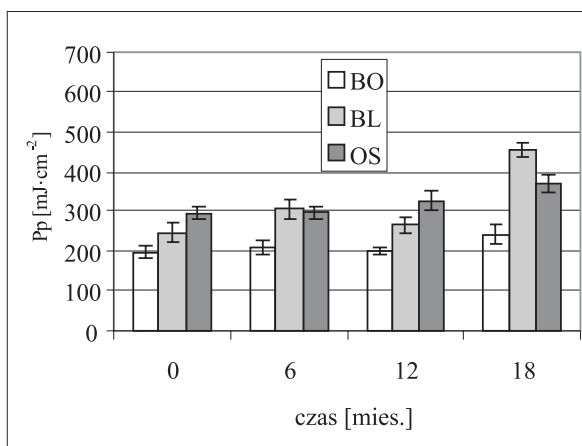
Rys. 61. Wartość pracy przecinania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 61. Cutting work values for rehydrated carrot after freeze drying



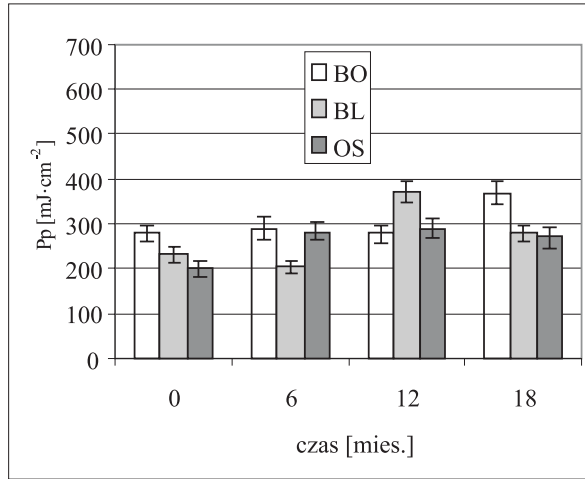
Rys. 62. Wartość pracy przecinania marchwi ponownie uwodnionej po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 62. Cutting work values for rehydrated carrot after vacuum-microwave drying



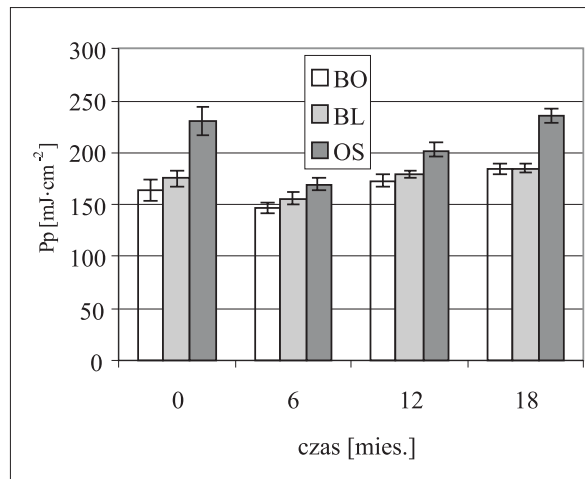
Rys. 63. Wartość pracy przecinania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 63. Cutting work values for rehydrated parsley after convective drying



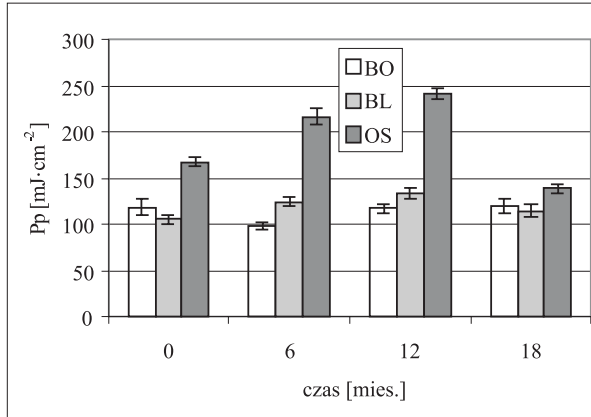
Rys. 64. Wartość pracy przecinania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 64. Cutting work values for rehydrated parsley after freeze drying



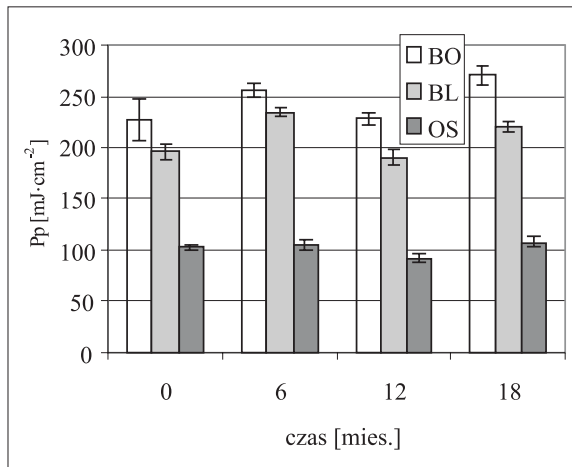
Rys. 65. Wartość pracy przecinania pietruszki ponownie uwodnionej po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 65. Cutting work values for rehydrated parsley after vacuum-microwave drying



Rys. 66. Wartość pracy przecinania selera ponownie uwodnionego po suszeniu konwekcyjnym
 Fig. 66. Cutting work values for rehydrated celery after convective drying



Rys. 67. Wartość pracy przycinania selera ponownie uwodnionego po suszeniu sublimacyjnym
 Fig. 67. Cutting work values for rehydrated celery after freeze drying



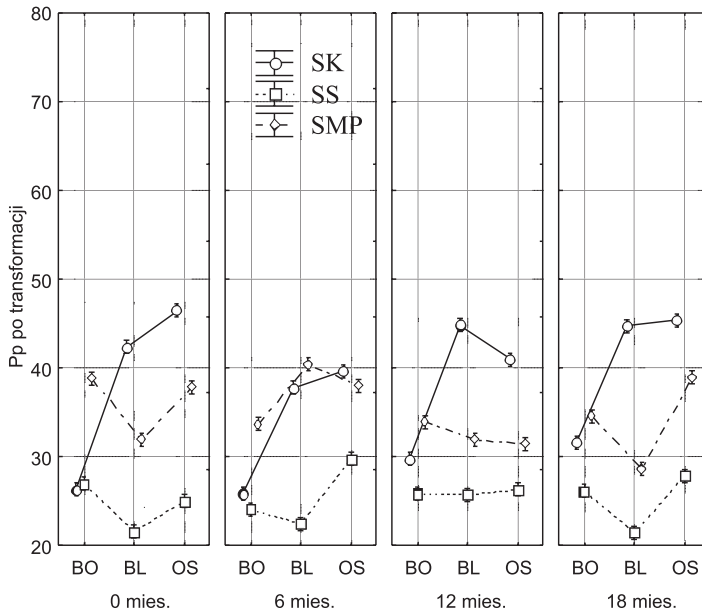
Rys. 68. Wartość pracy przycinania selera ponownie uwodnionego po suszeniu mikrofalowym
 Fig. 68. Cutting work values for rehydrated celery after vacuum-microwave drying

Należy zwrócić uwagę na istotne obniżenie wartości pracy przecinania selera odwodnionego osmotycznie przed suszeniem mikrofalowym (rys. 68) w stosunku do odporności na przecinanie produktów pochodzących z selera nie poddanego obróbce wstępnej lub blanszowanego. Może być to związane ze skumulowanym działaniem na charakterystyczną strukturę komórkową selera dwóch czynników: wnikania substancji osmoaktywnej w trakcie odwadniania osmotycznego i intensywnego usuwania wody w trakcie suszenia.

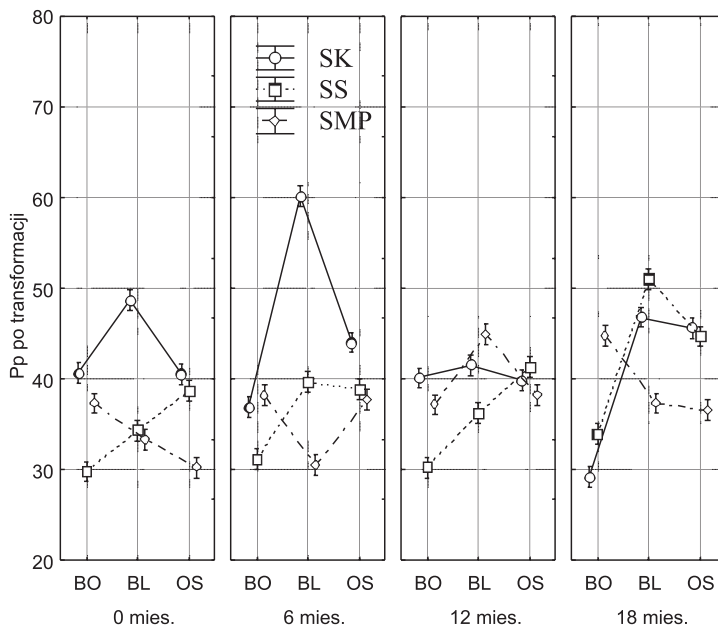
Nie udowodniono znaczącego wpływu czasu przechowywania suszy warzywnych na wartość pracy przecinania materiałów ponownie uwodnionych. Największą stabilność w tym zakresie stwierdzono dla warzyw niepoddanych zabiegom wstępnym.

Złożone interakcje poszczególnych czynników wpływających na wartość pracy przecinania materiałów ponownie uwodnionych wykazała analiza statystyczna, która stała się podstawą dalszych rozważań zawartych w niniejszym rozdziale.

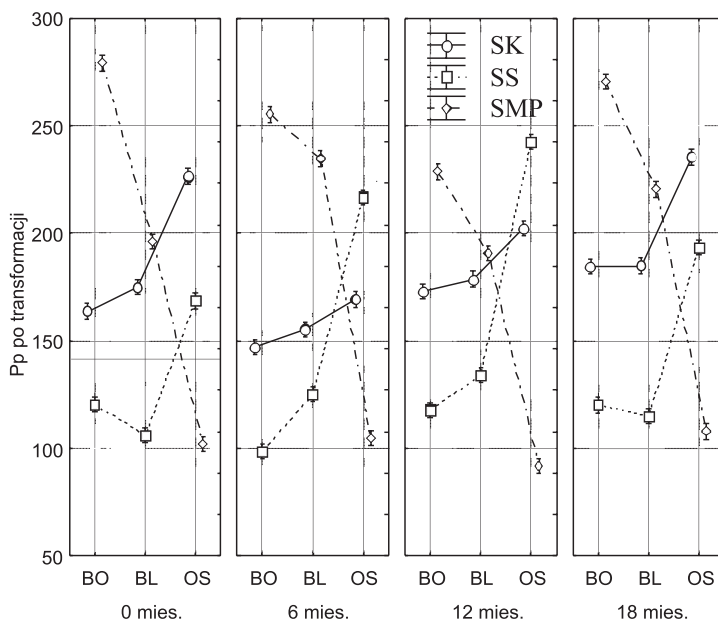
Spośród badanych technik suszenia metoda sublimacyjna pozwala uzyskać produkt, którego przecięcie po ponownym uwodnieniu najczęściej wymaga najniższych nakładów energetycznych (rys. 69–71). W większości przypadków produkt uwodniony uzyskany metodą konwekcyjną charakteryzuje się wyższą odpornością na przecinanie niż materiał wysuszony mikrofalowo. Zależność ta jest szczególnie wyraźna dla marchwi i pietruszki.



Rys. 69. Wytrzymałość na przecinanie suszy z marchwi po uwodnieniu
Fig. 69. Cutting strength of rehydrated carrot



Rys. 70. Wytrzymałość na przecinanie suszu z pietruszki po uwodnieniu
 Fig. 70. Cutting strength of rehydrated parsley



Rys. 71. Wytrzymałość na przecinanie suszu z selera po uwodnieniu
 Fig. 71. Cutting strength of rehydrated celery

Brak jest jednoznacznych zależności wpływu zabiegów wstępnych przed suszeniem na wartości analizowanej cechy, jednakże w istotnym stopniu zmieniają one odporność mechaniczną produktów ponownie uwodnionych, **co potwierdza hipotezę H₃**. Odwodnienie osmotyczne surowca przed suszeniem sublimacyjnym pozwala uzyskać susze, które po uwodnieniu mają istotnie podwyższoną odporność na przecinanie w stosunku do produktów uzyskanych z surowców niepoddanych zabiegom wstępnym.

Nie stwierdzono istotnych zmian w wytrzymałości na przecinanie dla materiałów uwodnionych pochodzących z suszy przechowywanych próżniowo przez 18 miesięcy.

Istotnie podwyższoną odpornością na przecinanie charakteryzuje się marchew ponownie uwodniona po suszeniu konwekcyjnym, pochodząca z surowca blanszowanego lub odwodnionego osmotycznie. Najniższe nakłady energetyczne należy ponieść w trakcie przecinania materiału uwodnionego uzyskanego z marchwi blanszowanej przed suszeniem sublimacyjnym (rys. 69).

Nieco inny jest rozkład grup jednorodnych dla pietruszki i selera. W przypadku pietruszki najwyższą odporność na przecinanie zaobserwowano dla materiału uwodnionego po suszeniu konwekcyjnym, ale tylko nieco niższą wytrzymałością na przecinanie charakteryzuje się materiał uwodniony po suszeniu sublimacyjnym. Oba przypadki dotyczą produktów uzyskanych z surowców blanszowanych. Do grupy materiałów o najniższej wytrzymałości na przecinanie należą uwodnione produkty uzyskane metodą konwekcyjną lub sublimacyjną, ale tylko dla surowców niepoddanych obróbce wstępnej. Równie niską wytrzymałość na przecinanie ma pietruszka odwodniona osmotycznie lub blanszowana przed suszeniem mikrofalowym (rys. 70).

Seler nie poddany zabiegom wstępnym przed suszeniem mikrofalowym cechuje się najwyższą wytrzymałością na przecinanie. Zastosowanie odwodnienia osmotycznego pozwala uzyskać materiał, który po uwodnieniu charakteryzuje się najniższą wytrzymałością na przecinanie spośród wszystkich badanych produktów (rys. 71).

5.8. Relaksacja naprężeń

W celu opisanie wpływu metody suszenia, obróbki wstępnej i czasu przechowywania suszy na właściwości reologiczne badanych produktów rolniczych w niniejszej pracy wykorzystano metodę porównywania przebiegu krzywych relaksacji naprężeń zaproponowaną przez Stropka i Gołackiego [2006].

Wykorzystane metody suszenia charakteryzują się odmiennymi mechanizmami usuwania wilgoci z wysoko uwodnionych surowców roślinnych. Parametry prowadzenia procesów dobrano tak, aby produkt cechował się maksymalnie wysoką jakością (ocenianą przez przyzmat wielu kryteriów), przy zadowalającej efektywności odwadniania. Dlatego nie stosowano skrajnych warunków prowadzenia procesów, co spowodowało uzyskanie produktów stosunkowo niewiele różniących się od siebie w zakresie cech reologicznych.

Zbiornicze wyniki badań przedstawiono w załączniku w formie tabel Z7–Z12. Wybrane aspekty zobrazowano wykresami (rys. 72–74). Rysunek 72 dotyczy wpływu metody suszenia na wartości parametrów a i b w poszczególnych okresach przechowywania suszy na przykładzie uwodnionej marchwi. Rysunek 73 przedstawia wpływ obróbki

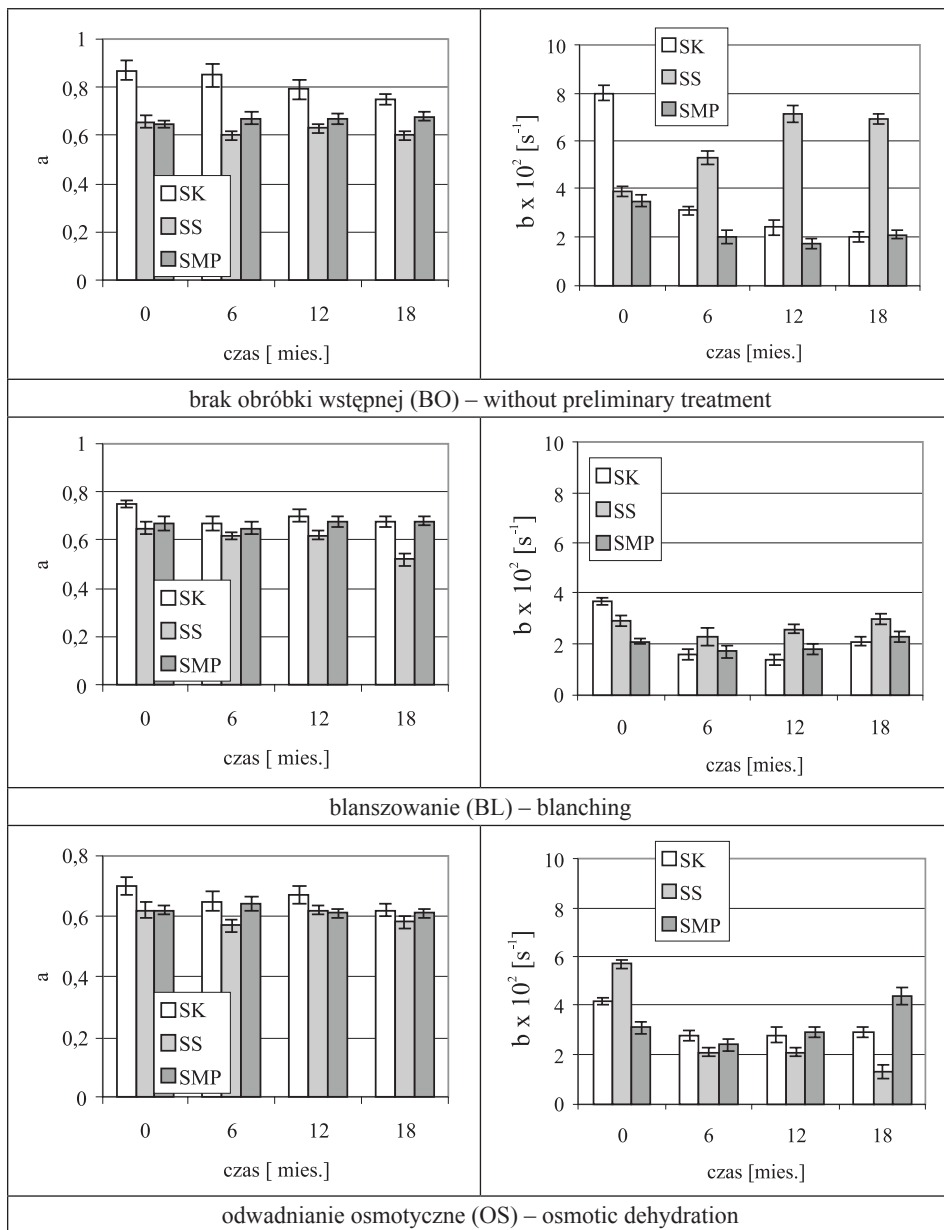
wstępnej na cechy reologiczne na przykładzie suszonej pietruszki, natomiast na rysunku 74 przedstawiono wpływ czasu przechowywania suszu na wartości parametrów a i b na przykładzie uwodnionego selera.

Spośród suszy najwyższą sprężystością charakteryzują się produkty uzyskane metodą konwekcyjną pochodzące z surowców niepoddanych zabiegom wstępnym. W trakcie testów relaksacji następuje najmniejszy spadek naprężenia, przejawiający się najniższą wartością parametru a , z jednocześnie niewielką prędkością przebiegu zjawiska wyrażoną małą wartością parametru b . Potrzeba znacznie dłuższego czasu, aby produkty uzyskane z surowców niepoddanych zabiegom wstępnym i suszone konwekcyjnie osiągnęły poziom naprężenia o wartości $a/2$. Przyczyn takiego stanu rzeczy można prawdopodobnie upatrywać w różnicach w wilgotnościach suszy uzyskiwanych różnymi metodami. Wilgotność suszy warzywnych otrzymanych konwekcyjnie wynosiła do 10%. Przy pozostałych dwóch metodach wilgotność suszy była niższa i wynosiła 2–6%. Wynika z tego, że ilość wody pozostajej w matriks ścian komórkowych suszy uzyskanych metodą konwekcyjną była dwa razy większa i mogła decydować o częściowym zachowaniu pierwotnej struktury micelarnej ścian, a więc i o sprężystości układu, **co potwierdza hipotezę roboczą H₁ sformułowaną w rozdziale 2.**

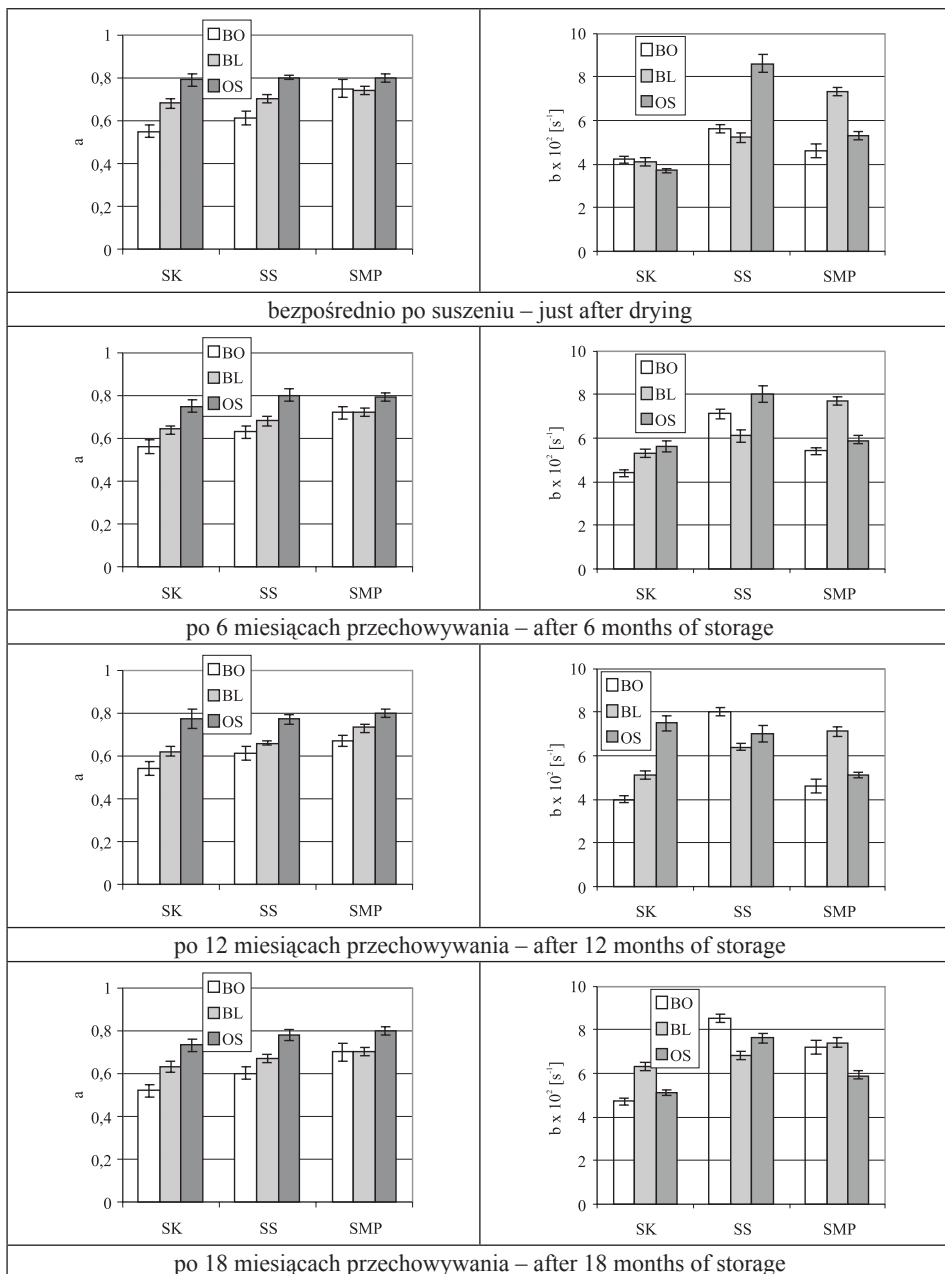
Nie zaobserwowano różnic w zakresie analizowanych cech reologicznych pomiędzy suszami uzyskanymi metodą sublimacyjną i mikrofalową przy istotnie niższej sprężystości suszy otrzymanych metodą konwekcyjną. Krokida i in. [1999] wykazali, że produkty suszenia sublimacyjnego charakteryzują się największymi stratami sprężystości występującymi pomiędzy suszami i materiałami uwodnionymi. Stwierdzili, że odwodnienie osmotyczne surowca przed suszeniem sublimacyjnym pomaga utrzymać suszom ich elastyczność.

Prawidłowa ocena przebiegu zmienności cech reologicznych musi obejmować jednoczesną analizę obu parametrów (a i b). Charakterystyczne jest to, że w pewnych przypadkach niskiemu poziomowi spadku naprężeń towarzyszy stosunkowo duża szybkość procesu, np. uwodniony susz z marchwi niepoddanej obróbce wstępnej i suszonej sublimacyjnie (rys. 72).

Spośród badanych surowców najniższą sprężystością cechuje się seler, a najwyższą pietruszka. Koresponduje to z wilgotnością surowców, która dla selera jest najwyższa i wynosi około 90%, a dla pietruszki najniższa i osiąga wartość około 84%. Oznacza to, że materiały o wysokiej wilgotności są podatniejsze na degradację struktury komórkowej podczas oddziaływania sił zewnętrznych. Wartość a dla selera wynosi 0,40, a dla marchwi 0,39, ale prędkość zaniku naprężeń w trakcie relaksacji selera jest ponad 2,5 razy większa (tabele Z7–Z12). Jakubczyk i Lewicki [2003] sugerują, aby tkankę roślinną traktować jako zespół zależnych od siebie komórek otoczonych lepko-sprężystą ścianą komórkową. Czynnikiem istotnie wpływającym na zachowanie się odkształcanego surowca jest turgor, który przeciwdziała zapadaniu się komórek. Dopiero po przekroczeniu ciśnienia wewnątrzkomórkowego możliwe jest odkształcanie komórek, zmiany ich kształtu oraz wystąpienie nacisków pomiędzy sąsiednimi komórkami. Błazka środkowa, łącząca sąsiednie komórki, może być rodzajem „amortyzatora” łagodzącego skutki pojawiających się naprężeń. Stan zachowania błazki środkowej po procesie suszenia może decydować o cechach reologicznych produktów.

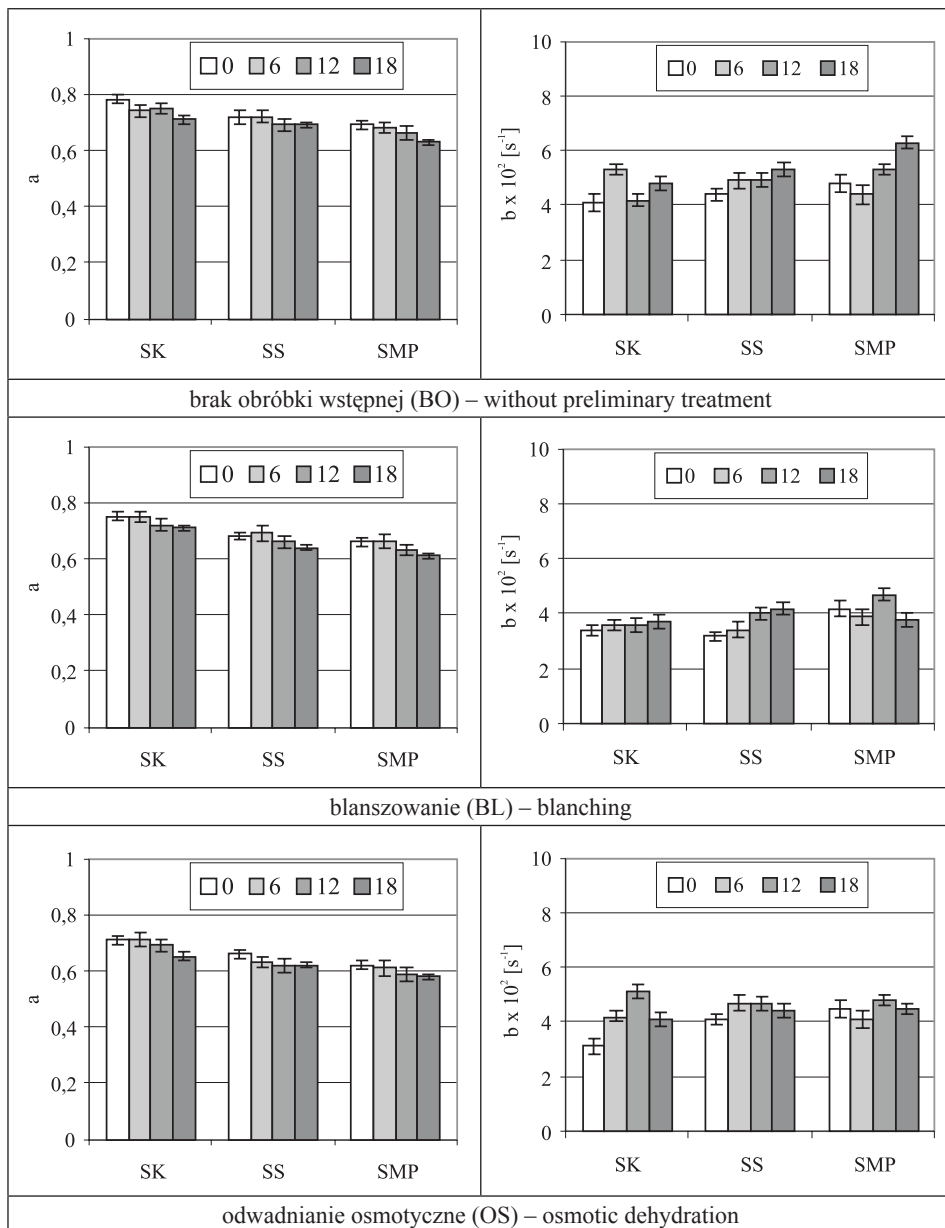


Rys. 72. Wpływ metody suszenia na wartości parametrów a i b uzyskanych podczas badania relaksacji naprężeń ponownie uwodnionej marchwi
 Fig. 72. The effect of drying method on the parameters a and b obtained during stress relaxation of rehydrated carrot



Rys. 73. Wpływ obróbki wstępnej na wartości parametrów a i b uzyskanych podczas badania relaksacji naprężeń suszu z pietruszki

Fig. 73. The effect of pretreatment on the parameters a and b obtained during stress relaxation of dried parsley



Rys. 74. Wpływ czasu przechowywania suszu na wartości parametrów a i b uzyskanych podczas badania relaksacji naprężeń ponownie uwodnionego selera

Fig. 74. The effect of storage time on parameters a and b obtained during stress relaxation of rehydrated celery

Dla wszystkich badanych warzyw stwierdzono znaczny spadek sprężystości materiałów wysuszonych i ponownie uwodnionych w stosunku do sprężystości surowców, mimo że wilgotności były zbliżone. Jedną z przyczyn utraty sprężystości są ubytki masy składników suchej substancji w trakcie rehydracji, powodujące obniżenie gęstości materiału, drugą – pęknięcia ścian komórkowych, pojawiające się na zdjęciach mikroskopowych dopiero po uwodnieniu suszy. Najniższą sprężystość mają warzywa ponownie uwodnione po suszeniu konwekcyjnym.

Blanszowanie surowców, a jeszcze bardziej odwadnianie osmotyczne, istotnie obniżają sprężystość suszy oraz materiałów ponownie uwodnionych. Zależność utrzymuje się przez cały założony okres przechowywania suszy. Najmniejszy wpływ obróbki wstępnej na sprężystość produktów występuje przy metodzie mikrofalowej, gdzie różnice pomiędzy cechami reologicznymi materiału uzyskanego z surowca niepoddanego zabiegom wstępnym, odwodnionego osmotycznie lub blanszowanego są nieistotne (rys. 73). Istotność wpływu odwadniania osmotycznego na właściwości reologiczne jabłek potwierdzają badania Lewickiego i Łukaszuk [2000] oraz Farrisa i in. [2008], mimo że cechy reologiczne badano metodą zmodyfikowaną, gdzie pierwsza faza procesu (ściśkanie) trwała dłużej niż faza relaksacji naprężeń. Inni badacze wskazują, że faza ściskania powinna być wykonana z możliwie maksymalną prędkością, aby relaksacja naprężeń występująca w jej trakcie nie miała decydującego wpływu na zasadniczy przebieg relaksacji naprężeń [Gołacki 1996, Gołacki i in. 2005].

Biorąc pod uwagę wartość parametru a , należy stwierdzić, że w trakcie próżniowego przechowywania suszy sprężystość materiałów ulega stosunkowo niewielkiej zmianie, ale z zauważalną tendencją do wzrostu. Produkt uzyskany przy wykorzystaniu badanych metod suszenia oraz zabiegów wstępnych i poddany testom bezpośrednio po suszeniu charakteryzuje się statystycznie istotnie niższą sprężystością od sprężystości materiałów przechowywanych przez 18 miesięcy. W większości przypadków wartość parametru b nie zmienia się podczas przechowywania suszy lub minimalnie rośnie, co jedynie potwierdza niewielki wpływ okresu magazynowania suszy na cechy reologiczne materiałów. Niewielki wzrost sprężystości produktów w trakcie przechowywania wynika z mikromigracji wilgoci w obrębie ścian komórkowych, a w szczególności wewnątrz macierzy, w której zatopione są mikrofibryle celulozowe. Jako przykład zaprezentowano wykresy zmian wartości parametrów a i b dla uwodnionego selera (rys. 74).

Prędkość zaniku naprężeń jest również najwyższa dla produktu uzyskanego z surowca odwodnionego osmotycznie. Chlorek sodu przedostający się do wnętrza struktury komórkowej warzyw w trakcie odwadniania osmotycznego narusza ciągłość budowy ścian komórkowych, które podczas suszenia ulegają dalszej degradacji.

6. DYSKUSJA NAD WYNIKAMI I PODSUMOWANIE

Analiza piśmiennictwa obejmująca badania jakości produktów spożywczych wskazuje, że tekstura produktów żywnościowych może być badana w oparciu o metody sensoryczne lub instrumentalne. W analizie sensorycznej wykorzystuje się zmysły takie jak: węch, smak, słuch lub dotyk, podczas gdy analiza instrumentalna bazuje na testach mechanicznych. Jakubczyk i Uziak [2005] wykazali, że testy wytrzymałościowe (ściskanie i cięcie) są bardzo dobrym wskaźnikiem tekstury, co potwierdzili dla wielu tkanek roślinnych. Natomiast Frączek i Mudryk [2006] wykorzystali testy przecinania do wyznaczenia oporów jednostkowych oraz siły i pracy cięcia pędów wierzby.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań eksperymentalnych dostarczyły informacji, które w kilku przypadkach potwierdzają rezultaty uzyskane przez innych autorów, a w innych się różnią, co może wynikać z różnic morfologicznych pomiędzy badanymi surowcami, różnych technik suszenia i warunków prowadzenia procesów oraz odmiennych zabiegów wstępnych.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że susze warzywne uzyskane metodą konwekcyjną charakteryzują się obniżoną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie suszy otrzymanych pozostałymi metodami.

Podobne zależności zaobserwowali Marzec i Pasik [2008], analizując wpływ suszenia fluidalnego, konwekcyjnego, mikrofalowego i sublimacyjnego na cechy mechaniczne suszy marchwiowych. Zwiększenie temperatury czynnika suszącego do poziomu powyżej 70°C powoduje wzrost odporności na ściskanie suszu z jabłek [Lewicki i Jakubczyk 2004].

Suszenie mikrofalowe w warunkach obniżonego ciśnienia oraz suszenie sublimacyjne pozwalają uzyskać produkt, którego ściskanie wymaga istotnie większych nakładów pracy w porównaniu do suszu konwekcyjnego.

Analogiczne rezultaty uzyskali Bondaruk i inni [2007], badając susze ziemniaczane. Kramkowski i inni [2001c] wykazali wpływ miejsca pobrania próbki z korzenia selera na wartość pracy ściskania suszu sublimacyjnego. Struktura wewnętrzna suszy sublimacyjnych zależy, w dużej mierze, od warunków prowadzenia fazy wstępnego zamrażania tkanki roślinnej. Szczególnie istotna jest prędkość zamrażania, która decyduje o wielkości tworzących się kryształków lodu. Mała prędkość powoduje powstawanie dużych kryształków lodu, które uszkadzają ściany komórkowe. Shi i inni [1998] sugerują, że należy w sposób kontrolowany zmieniać temperaturę w trakcie zamrażania, co pozwala uzyskać lepszą jakość materiału przeznaczonego do suszenia sublimacyjnego.

Blanszowanie surowca przed suszeniem istotnie zwiększa wartość sił występujących w trakcie ściskania suszy.

Nieliczna literatura z tego zakresu nie pozwala na jednoznaczną weryfikację powyższego stwierdzenia, bo chociaż badania Lentas i Witrowej-Rajchert [2009] oraz Leeratanaraka i in. [2006] wskazują na istotność wpływu blanszowania na odporność suszy na ściskanie, to w pierwszym wypadku wykazano, że niższa temperatura i dłuższy czas blanszowania powodują wzrost twardości tkanek selera, co określono w oparciu o wartości pracy ściskania. Leeratanaraka i in. [2006] stwierdzili natomiast, że blanszowanie obniża twardość suszu ziemniaczanego, ale definiowali ten wskaźnik jako maksymalną siłę występującą w trakcie ściskania suszu.

Inaczej kształtują się zależności związane z odpornością na ściskanie suszy po ponownym uwodnieniu. Zakres modyfikacji odporności na ściskanie takich materiałów jest znacznie mniejszy niż suszy. Produkty uzyskane metodą sublimacyjną charakteryzują się wyższą odpornością na ściskanie niż materiały uwodnione po suszeniu konwekcyjnym lub mikrofalowym. Zarówno blanszowanie, jak i odwadnianie osmotyczne istotnie zmieniają wartości pracy potrzebnej do odkształcenia próbki.

Mało jest doniesień literaturowych pozwalających na porównanie wpływu różnych technik suszenia na cechy mechaniczne produktu, uwzględniających aspekty związane z obróbką wstępną i przechowywaniem suszy. Jedynie Figiel i in. [2006] badali wytrzymałość na ściskanie uwodnionego miąższu buraka ćwikłowego po suszeniu mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia. Natomiast Kramkowski i in. [2001c] testom ściskania poddawali kostki selera uwodnionego po suszeniu sublimacyjnym. W obu przypadkach badacze uznali, że zmiany wartości pracy ściskania można traktować jako wyróżnik negatywnego oddziaływania procesu suszenia na strukturę wewnętrzną materiału.

Przebieg procesu rehydracji suszy decyduje o cechach produktu uwodnionego. Szczególnie istotne są ubytki rozpuszczalnych składników suchej substancji, które znacząco osłabiają strukturę materiału. Wielu badaczy potwierdza tę tezę, że tkanka roślinna w trakcie ponownego uwadniania nie jest w stanie wchłonąć takiej ilości wody, jaka znajdowała się w surowcu, a wielkość ubytków rozpuszczalnych składników suchej substancji zależy od składu chemicznego i struktury danego materiału [Khraisheh i in. 2004, Giri i Prasad 2007, Marabi i in. 2006, Witrowa-Rajchert 1999]. Rehydracja jest również traktowana jako ważny wskaźnik negatywnego oddziaływania suszenia na strukturę wewnętrzną materiałów tkankowych.

W trakcie przechowywania suszy odporność na ściskanie zarówno suszy, jak i materiałów ponownie uwodnionych nie ulega istotnym zmianom, chociaż widoczna jest niewielka tendencja spadkowa. Związane jest to głównie z migracją wilgoci zawartej w ścianach komórkowych.

Wcześniej wykonane badania dla korzenia pietruszki [Stępień i Michalski 2005] wykazały istotną zmienność wartości pracy ściskania podczas przechowywania, jednakże okres magazynowania ograniczono do 12 miesięcy i nie uwzględniono interakcji pomiędzy poszczególnymi czynnikami wpływającymi na zmienność analizowanej cechy. Brak jest innych doniesień literaturowych mówiących o zmianach cech mechanicznych suszy w trakcie przechowywania.

Zarówno susze, jak i materiały ponownie uwodnione po suszeniu sublimacyjnym charakteryzują się obniżoną odpornością na przecinanie w stosunku do produktów pochodzenia konwekcyjnego lub mikrofalowego. Wynika to ze zmian w budowie komórkowej produktów uzyskanych metodą sublimacyjną, które mają cienkie i delikatne ściany tworzące strukturę mało odporną na przecinanie. Ponadto proces uwadniania, powodując pęcznienie materiału, pogłębia destrukcyjne zmiany struktury tkankowej powstałe w czasie suszenia. Pojawiają się liczne pęknięcia ścian komórkowych, co obserwowano na zdjęciach mikroskopowych analizowanych w niniejszej pracy.

Jest to odpowiedź na pytanie stawiane przez Witrową-Rajchert [1999] o to, który z procesów: suszenie czy rehydracja powoduje rozrywanie ścian komórkowych. Obniżona odporność na przecinanie produktów suszenia sublimacyjnego wynika również z faktu, że tego rodzaju susze charakteryzują się minimalnym skurczem, co powoduje, że jego gęstość jest niższa niż gęstość suszy uzyskanych innymi technikami odwadniania. Sprzeczne są doniesienia literaturowe mówiące o zmianach gęstości marchwi suszonej konwekcyjnie. Krzykowski i Rydzak [2001] utrzymują, że gęstość marchwi maleje w całym zakresie zmian wilgotności od 87 do 0%, natomiast Nowak i in. [1998] stwierdzili, że do usunięcia 80% wody gęstość marchwi się nie zmienia, a następnie rośnie.

Zabiegi wstępne blanszowania i odwadniania osmotycznego istotnie zmieniają wartość pracy przecinania suszy i materiałów uwodnionych.

Jakubczyk i Ksionek [2006] wykazały istotność wpływu rodzaju substancji osmoaktywnej, wykorzystanej podczas odwadniania osmotycznego, na wartości maksymalnych sił cięcia i wartości pracy cięcia jabłek suszonych konwekcyjnie. Roztwór sacharozy pozwala uzyskać materiał o najwyższej odporności na przecinanie, natomiast syrop jabłkowy obniża wartości siły i pracy cięcia.

Spośród badanych surowców najniższą sprężystością charakteryzuje się seler, wyższą marchew, a najwyższą pietruszka. Zauważalna jest korelacja pomiędzy wilgotnością surowców i ich sprężystością. Surowce o wysokiej wilgotności są podatniejsze na degradację struktury komórkowej spowodowaną oddziaływaniem sił zewnętrznych. Produkty uzyskane metodą konwekcyjną charakteryzują się wyższą sprężystością w stosunku do sprężystości produktów otrzymanych pozostałymi dwiema metodami.

Zarówno blanszowanie, jak i odwadnianie osmotyczne obniżają sprężystość produktu końcowego. Konkluzję tę potwierdzają badania relaksacji naprężeń surowców takich jak cebula [Ahmed i in. 2001] czy owoce kiwi [Gerschenson i in. 2001]. Również badania Lewickiego i Łukaszuk [2000] wskazują na silny związek odwadniania osmotycznego jabłek przed suszeniem konwekcyjnym z właściwościami reologicznymi produktu. Przyczyną jest tworząca się warstwa roztworu cukru o wysokim stężeniu na powierzchni odwadnianego osmotycznie materiału, co istotnie zmienia przebieg suszenia i w efekcie sprężystość produktu. W dostępnej literaturze nie ma wyników badań porównawczych w zakresie cech reologicznych materiałów uzyskanych różnymi metodami suszenia.

Do wyznaczania właściwości lepko-sprężystych wykorzystuje się również testy pełzania [Kolowca 2004]. Zaobserwowano duże zróżnicowanie wartości modułów sprężystości oraz prędkości pełzania pomiędzy badanymi surowcami. Charakterystyki reologiczne warzyw takich jak: marchew, pietruszka, seler czy rzodkiew różnią się istotnie od

charakterystyk buraków. Należy więc przypuszczać, że również po wysuszeniu produkty będą znacząco się różniły cechami reologicznymi.

Badania przedstawione w niniejszej pracy dowodzą, że produkty odwodnione charakteryzują się dużo większą stabilnością cech reologicznych w czasie magazynowania w stosunku do surowców. W trakcie przechowywania suszy następuje niewielki wzrost sprężystości materiału występującego zarówno w formie suszu, jak i materiału uwodnionego.

Odwodnione sublimacyjnie jabłka przechowywane w środowiskach o różnej aktywności wody wykazują malejący udział elementów sprężystych we właściwościach mechanicznych oraz malejącą twardość materiału [Rowicka i in. 2002]. Aspekt przechowywania świeżych bulw ziemniaka i związanych z tym zmian właściwości reologicznych badali Kolowca i inni [2006]. Już 3-miesięczny okres przechowywania surowca powoduje obniżenie wartości modułów sprężystości i wzrost prędkości pełzania.

Sprężystość materiałów ponownie uwodnionych jest znacznie obniżona w stosunku do sprężystości surowców mimo zbliżonych wartości wilgotności. Jest to spowodowane dużymi ubytkami rozpuszczalnych składników suchej substancji podczas rehydracji. Najniższe ubytki składników suchej substancji występują dla produktów uzyskanych metodą sublimacyjną. Odwadnianie osmotyczne sprzyja wzrostowi ilości substancji dyfundującej do roztworu w trakcie ponownego uwadniania. Należy sądzić, że z materiału do roztworu przedostają się również wcześniej wchłonięte cząsteczki substancji osmoaktywnej. Surowce blanszowane charakteryzują się mniejszymi ubytkami suchej substancji podczas rehydracji, gdyż w trakcie samego zabiegu wstępnego nastąpiły istotne ubytki substancji rozpuszczalnych.

Dostępna literatura pozwala określić wpływ metody suszenia na różnice między suszami i materiałami ponownie uwodnionymi w zakresie cech reologicznych [Krokida i in. 1999]. Suszenie sublimacyjne jest metodą pozwalającą uzyskać produkt, który po uwodnieniu najbardziej traci elastyczność w stosunku do elastyczności suszu. Ponadto temperatura płyty grzejnej, w trakcie suszenia sublimacyjnego, istotnie wpływa na wartości modułów sprężystości oraz wartości współczynników lepkości dynamicznej ponownie uwodnionego selera [Stępień i in. 2003].

Woda usuwana ze ścian komórkowych jest wodą związaną głównie z pektynami i hemicelulozą będącą budulcem matriks [Horubała 1975]. Powoduje to powstawanie naprężeń wewnętrznych odpowiadających za deformację ścian aż do wystąpienia przerwania ciągłości struktury, co obserwuje się na zdjęciach mikroskopowych zamieszczonych w niniejszej pracy. Odporność mechaniczna materiałów o strukturze komórkowej zależy od stanu zachowania tej struktury, która może zmieniać się pod wpływem wielu czynników: fazy rozwoju rośliny, warunków uprawy, warunków przechowywania czy oddziaływania procesów technologicznych. Opis mechanizmów różnych zjawisk wymaga „wglądu” do wnętrza badanego materiału, np. poprzez wykonanie zdjęć mikroskopowych. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy wskazują, że spośród zaproponowanych wskaźników określających stopień degradacji struktury komórkowej *kolistość* jest najbardziej przydatnym parametrem, pozwalającym dokonywać jednoznacznej oceny porównawczej różnych struktur komórkowych.

Thiel i Donald [1998] obserwowali w czasie rzeczywistym zmiany struktury wewnętrznej marchwi poddawanej testom ściskania, rozciągania i przecinania. Zdjęcia mikroskopowe pozwoliły wyjaśnić mechanizm powstawania uszkodzeń. Inni badacze wykorzystywali również obrazy mikroskopowe do analizy zmian struktury selera i pietruszki podczas suszenia [Łapczyńska-Kordon 2000, 2005], jabłek i marchwi podczas odwadniania osmotycznego [Kowalska i Lenart 2005, Lewicki i Porzecka-Pawlak 2005] oraz w trakcie przechowywania korzenia marchwi [McGarry 1995]. Stosowano różne wskaźniki oceny stopnia zachowania struktury tkankowej: współczynnik kształtu, średnia średnica komórki, wielkość przestrzeni międzykomórkowych, przekrój poprzeczny komórki, długość i szerokość komórki, a także tzw. powierzchnię szarą w obrazie. Wynika z tego, że każdorazowo wykorzystywano taki wskaźnik, który niósł maksymalną ilość informacji przydatnych do interpretacji powstawania i przebiegu określonych zjawisk fizycznych.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają możliwość istotnej modyfikacji cech mechanicznych i reologicznych warzyw poddanych różnym metodom suszenia. Jest to zbliżone z wynikami badań Gawłka [2005] oraz Lin i in. [1998], którzy analizowali zmienność cech sensorycznych, rehydracyjnych, barwy i gęstości produktów uzyskanych różnymi technikami odwadniania. Z ich punktu widzenia metoda sublimacyjna i mikrofalowa w warunkach obniżonego ciśnienia są znacznie korzystniejsze od metody konwekcyjnej. Jednak biorąc pod uwagę odporność mechaniczną produktu, zastosowanie konwekcyjnego sposobu usuwania wody może być uzasadnione.

Modyfikacja cech mechanicznych i reologicznych jest możliwa w najszerszym zakresie dla suszu marchwi, a w znacznie mniejszym dla pietruszki i selera. Marchew, również po ponownym uwodnieniu, charakteryzuje się największymi możliwościami zmian wartości wskaźników wytrzymałościowych i reologicznych, natomiast w najniższym stopniu można zmieniać cechy selera. Suszenie jest zabiegiem na tyle zmieniającym strukturę wewnętrzną produktu w stosunku do materiału wyjściowego, że nie jest możliwe, aby produkt cechował się takimi samymi właściwościami jak surowiec. Stosując najnowsze techniki suszarnicze, z uwzględnieniem zabiegów wstępnych, można zmieniać właściwości produktów w szerokim zakresie, a więc wytwarzać produkty najodpowiedniejsze dla danego celu.

Istotną częścią rozprawy było określenie wpływu czasu próżniowego przechowywania suszy na cechy mechaniczne i reologiczne. Okazało się, że w trakcie przyjętego 18-miesięcznego okresu przechowywania suszy większość z badanych cech ulega zmianom tylko w nieznacznym zakresie, co jest spowodowane niewielką migracją wilgoci w obrębie ścian komórkowych suszy.

Doniesienia literaturowe oraz wyniki badań własnych pozwalają stwierdzić, że suszenie sublimacyjne i mikrofalowe w warunkach obniżonego ciśnienia są metodami, dzięki którym uzyskuje się produkt, który w aspekcie badanych wskaźników spełnia kryteria dotyczące jakości zarówno suszy, jak i materiałów ponownie uwodnionych, stawiane wobec składników żywnościowych. Susze uzyskane za pomocą nowoczesnych technik mogą być przechowywane przez dłuższy okres bez niebezpieczeństwa wystąpienia istotnych zmian ich właściwości.

Pytanie o cechy produktu idealnego pozostaje bez odpowiedzi, ponieważ to przeznaczenie danego produktu decyduje o wymaganiach jakościowych. Przeprowadzone badania wykazały, że można w szerokim zakresie modyfikować właściwości produktów suszarniczych, w tym właściwości mechaniczne i reologiczne. Jest zatem możliwe sformułowanie algorytmu postępowania, pozwalającego uzyskać produkt o oczekiwanych cechach.

W oparciu o dostępne piśmiennictwo, dotyczące badań jakości surowców rolniczych i produktów przemysłu spożywczego, zaprezentowano szereg poglądów dotyczących możliwości wykorzystania różnych metod suszenia, w połączeniu z zabiegami wstępnymi, do utrwalania surowców pochodzenia rolniczego. Uzyskane informacje pozwalają na klasyfikację poszczególnych technik utrwalania żywności, ze szczególnym uwzględnieniem ich zalet i wad. Wykazano brak standaryzacji kryteriów kompleksowej oceny jakości produktów suszarniczych. Jakość suszy jest najczęściej określana, uwzględniając zmiany w obrębie właściwości sensorycznych (smak, zapach, barwa), skład chemiczny (zawartość witamin i substancji odżywczych), właściwości rekonstrykcyjne, a także zmiany struktury wewnętrznej. Znaczący jest fakt, że właściwości produktów suszarniczych, po ponownym uwodnieniu, są w niewielkim stopniu przedmiotem zainteresowania badaczy. Dostrzegalna jest luka w wiedzy dotyczącej cech mechanicznych i reologicznych produktów suszarniczych, występujących zarówno w formie suszy, jak i materiałów uwodnionych. Znajomość właściwości mechanicznych i reologicznych suszy jest istotna do dalszej przeróbki, transportu i magazynowania produktu. Cechy materiałów ponownie uwodnionych mają ogromny wpływ na ocenę sensoryczną i instrumentalną, decydującą o przydatności produktu do spożycia. Biorąc pod uwagę kolejność odczuć konsumenta w czasie konsumpcji produktów spożywczych, to obok barwy i zapachu – właściwości mechaniczne i reologiczne jako jedne z pierwszych decydują o akceptacji bądź odrzuceniu danego produktu. W trakcie przegryzania istotna jest wytrzymałość na przecinanie, dalsze rozdrabnianie pokarmu zależy od wytrzymałości na ściskanie, natomiast podczas żucia docierają do konsumenta bodźce związane z cechami reologicznymi, w szczególności elastyczność produktu.

W toku badań potwierdzono hipotezę roboczą H_1 zakładającą, że cechy mechaniczne i reologiczne suszy warzywnych zależą głównie od stopnia zachowania micelarnej struktury ścian komórkowych. Odporność mechaniczna żywej komórki roślinnej jest sumą oddziaływania turgoru, czyli ciśnienia hydrostatycznego protoplastu oraz sztywności ścian komórkowych. W trakcie suszenia następują nieodwracalne zmiany w budowie i funkcjonowaniu organelli komórkowych. Po uwodnieniu komórki nie może pojawić się ciśnienie hydrostatyczne, ponieważ zniszczeniu uległy również półprzepuszczalne błony cytoplazmatyczne. Zatem wytrzymałość mechaniczna wysuszonych tkanek roślinnych zależy od stanu zachowania pierwotnej struktury ścian komórkowych. Podstawowym budulcem ścian, decydującym o wytrzymałości na oddziaływanie sił zewnętrznych, są łańcuchy celulozy (błonnik) stabilizowane wiązaniami kowalencyjnymi. Układ wiązek celulozowych zatopiony jest w nierozciągliwej matriks, składającej się głównie z hemicelulozy i pektyn [Fry 1988, Woźny i in. 2001]. Najwyższą odpornością na działanie czynników mechanicznych, chemicznych i enzymatycznych charakteryzują się ściany, w których łańcuchy celulozy ułożone są równolegle do osi włókien, tworząc

formę krystaliczną (tzw. struktura micelarna). Zaprezentowane w niniejszej pracy zdjęcia mikroskopowe wskazują na duży stopień odkształcenia ścian komórek roślinnych poddanych suszeniu. Ponadto, po uwodnieniu suszy, pojawiają się pęknięcia struktury. Oznacza to więc, że w pewnych warunkach została zaburzona krystaliczna struktura łańcuchów celulozy, a nawet ich rozerwanie. **W sposób pośredni potwierdza to prawdziwość hipotezy H₁.** Wysokokrystaliczny błonnik (celuloza) ma moduł elastyczności zbliżony do wartości modułu żelaza lub stali [Horubała 1975]. Rozluźnienie struktury krystalicznej może nastąpić poprzez ogrzewanie lub dodanie soli. Temperatura występująca w trakcie suszenia lub blanszowania nie jest w stanie rozerwać łańcuchów celulozy, ale powoduje częściową degradację wiązań kowalencyjnych oraz rozpuszcza blaszkę środkową stabilizującą położenie sąsiednich komórek [Gerschenson i in. 2001]. **Analiza wyników badań z tego zakresu potwierdza hipotezę H₂.** Odwodnienie osmotyczne w roztworze NaCl, poprzez wnikanie chlorku sodu do struktury ścian komórkowych, wpływa na istotne zmiany w zakresie cech mechanicznych, **a wyniki badań potwierdzają hipotezę H₃.**

Należy oczekiwać, że zastosowanie innych metod suszenia oraz różnych parametrów prowadzenia procesów może zwiększyć zakres zmienności cech mechanicznych i reologicznych. Chodzi głównie o temperaturę i prędkość przepływu czynnika suszącego w trakcie suszenia konwekcyjnego, sposób dostarczania ciepła, temperaturę płyty grzejnej i szybkość zamrażania materiału przed suszeniem sublimacyjnym oraz moc mikrofal przy suszeniu mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia. Szczególnie duże nadzieje można wiązać z wykorzystaniem kombinowanych metod suszenia, pozwalających łączyć zalety różnych technik.

7. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły sformułowane hipotezy robocze, mówiące o zależności analizowanych cech mechanicznych i reologicznych suszonych warzyw od stanu zachowania micelarnej struktury ścian komórkowych, temperatury prowadzenia procesów oraz zjawiska wnikania substancji osmoaktywnej do struktury komórek roślinnych.

2. Zastosowanie różnych technik suszenia, w połączeniu z zabiegami wstępnymi, pozwala bardzo istotnie modyfikować odporność mechaniczną i cechy reologiczne produktów występujących zarówno w formie suszy, jak i materiałów uwodnionych.

3. Próżniowe magazynowanie suszy w temperaturze pokojowej bez dostępu światła umożliwia bezpieczne przechowywanie produktów suszarniczych bez wystąpienia istotnych zmian w zakresie cech mechanicznych i reologicznych.

4. Suszenie sublimacyjne jest techniką pozwalającą uzyskiwać susze warzywne o niskiej odporności mechanicznej, obniżonej sprężystości, o komórkach z cienkimi i w niewielkim stopniu pofałdowanymi ścianami oraz bardzo intensywnie wchłaniające wodę podczas rehydracji, ale o ograniczonych możliwościach jej utrzymania wewnątrz struktury. Susze po ponownym uwodnieniu mają podwyższoną wytrzymałość na ściskanie i obniżoną wytrzymałość na przecinanie w stosunku do materiałów uwodnionych uzyskanych innymi metodami suszenia.

5. Zarówno susze, jak i materiały uwodnione otrzymane metodą konwekcyjną mają obniżoną wytrzymałość na ściskanie i podwyższoną wytrzymałość na przecinanie w stosunku do materiałów suszonych innymi technikami. Sprężystość produktów otrzymanych metodą konwekcyjną jest szczególnie wysoka dla materiałów uwodnionych, a podczas rehydracji, przy najniższej dynamice wchłaniania wody, następują największe ubytki składników suchej substancji. Ściany komórkowe są pofałdowane, ale znacznie grubsze w stosunku do grubości ścian komórkowych suszy sublimacyjnych.

6. Metoda mikrofalowa w warunkach obniżonego ciśnienia pozwala otrzymać susze charakteryzujące się pośrednią wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na przecinanie pomiędzy wartościami uzyskiwanymi dla produktów suszenia sublimacyjnego lub konwekcyjnego, sprężystością obniżoną w stosunku do sprężystości zarówno suszy, jak i materiałów uwodnionych uzyskanych pozostałymi metodami, największymi możliwościami wchłaniania i utrzymania wody podczas rehydracji, grubością ścian komórkowych oraz stopniem ich pofałdowania zbliżonymi do wartości wskaźników charakteryzujących produkty pochodzenia konwekcyjnego.

7. Wpływ blanszowania na odporność mechaniczną zależy od techniki suszenia. Blanszowanie warzyw przed suszeniem mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia powoduje najczęściej spadek zarówno wytrzymałości na ściskanie, jak i wytrzymałości na przecinanie w stosunku do produktów uzyskanych z surowców odwodnionych osmotycznie lub niepoddanych zabiegom wstępnym. Blanszowanie powoduje wzrost sprężystości suszy i materiałów uwodnionych w stosunku do produktów otrzymanych z surowców niepoddanych operacjom wstępnym. Blanszowanie wykonane przed suszeniem sublimacyjnym bardzo istotnie zwiększa intensywność wchłaniania wody w pierwszej fazie rehydracji.

8. Zabieg wstępnego odwadniania osmotycznego surowców w roztworze chloru sodu osłabia strukturę tkankową, powodując zmniejszenie odporności na ściskanie suszy i materiałów uwodnionych. W wielu przypadkach proces ten skutkuje wzrostem wytrzymałości na przecinanie, szczególnie w odniesieniu do produktów pochodzących z surowców blanszowanych. Odwodnienie osmotyczne warzyw wykonane przed suszeniem powoduje spadek sprężystości oraz zacieranie się różnic pomiędzy poszczególnymi produktami w obrębie cech rekonstrykcyjnych. Wpływ odwadniania osmotycznego na strukturę komórkową produktów jest istotny i zależy od gatunku warzywa.

8. PIŚMIENNICTWO

- Abbott J.A., Lu R., 1996. Anisotropic mechanical properties of apples. *Transaction of the ASAE* 39(4), 1451–1459.
- Aguilera J.M., Chiralt A., Fito P., 2003. Food dehydration and product structure. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 432–437.
- Ahmed J., Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., 2001. Color degradation kinetics and rheological characteristics of onion puree. *Transaction of the ASAE*, 44(1), 95–98.
- Alibas I., 2007. Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering*, 96 (4), 495–502.
- Andrea A., Bilbao C., Fito P., 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63, 71–78.
- Arevalo-Pinedo A., Xidieh Murr F.E., 2007. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80, 152–156.
- Arroqui C., Rumsey T.R., Lopez A., Virseda P., 2001. Effect of different soluble solids in the water on the ascorbic acid losses during water blanching of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 47, 123–126.
- ASAE Standard, 1986, 1, 361.
- Azuara E., Cortes R., Garcia H.S., Berstain C.J., 1992. **Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law.** *International Journal of Food Science and Technology*, 27(4), 409–418.
- Baillon B., Marques Dias de Almeida M.C., 1994. Séchage sous vide: Analyse en termes d'apport énergétique Avantage d'un apport micro-ondes, Actes duième colloque université industrie CEE/CFE, Les techniques électriques et la qualité du séchage, Talence, France
- Bałaśniński H., Pyć W.K., Rzyński E., 1994. *Maszyny i aparatura technologiczna przemysłu spożywczego. cz. II. Urządzenia do wymiany ciepła i masy.* Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej
- Becker W.M., Kleinsmith L.J., Hardin J., 2003. *The world of the cell.* Ed. 5. Benjamin Cummings, San Francisco, Boston, New York, Capetown, Hong Kong, London, Madrid, Mexico City, Montreal, Munich, Paris, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto.
- Bentini M., Caprara C., Rondelli V., 2005. Mechanical properties of sugar beet roots. *Transaction of the ASAE*, 48(4), 1429–1439.

- Bestard M.J., Sanjuan N., Rossello C., Mulet A., Femenia A., 2001 Effect of storage temperature on the cell wall components of broccoli plant tissues during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 48, 317–323.
- Bickel P.J., Doksum K.A., 1977. *Mathematical statistics*. Holden-Day, Inc. 1.
- Biswal R.N., Wilhelm L.R., Rojas A., Mount J.R., 1997. Moisture diffusivity in osmotically concentrated diced sweet potato during air drying. *Transactions of the ASAE*, 40(5), 1383–1390.
- Bohdziewicz J., 2001a. Właściwości reologiczne związane z morfologią korzenia marchwi. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 51–58.
- Bohdziewicz J., 2001b. Zmienność cech reologicznych korzenia pietruszki. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 59–64.
- Bondaruk J., Markowski M., Błaszczak W., 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 81, 306–312.
- Boss E.A., Filho R.M., Vasco de Toledo E.C., 2004. Freeze drying process: real time model and optimization. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1475–1485.
- Chua K.J., Chou S.K., Mujumdar A.S., Ho J.C., Hon C.K., 2004. Radial-convective drying of osmotic treated agro-products: effect on drying kinetics and product quality. *Food Control*, 15, 145–158.
- Cohen J.S., Yang T.C.S., 1995. Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology*, 6, 20–25.
- Craig D.Q.M., Royall P.G., Kett V.L., Hopton M.L., 1999. The relevance of the amorphous state to pharmaceutical dosage forms: glassy drugs and freeze dried systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 179, 179–207.
- Curtiss J.H., 1943. On transformations used in the analysis of variance. *American of Mathematical Statistics*, 14.
- Domagała A., 1995. Strata suchej substancji i zużycie energii w procesie blanszowania na przykładzie marchwi. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCLXX*, 67–74.
- Domagała A., Janus P., 1993. Strata suchej substancji i zużycie energii w procesie blanszowania na przykładzie selerów. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCLXX*, 35–43.
- Doymaz I., Tugrul N., Pala M., 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 77, 559–565.
- Drouzas A.E., Schubert H., 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28, 203–209.
- Farris S., Gobbi S., Torreggiani D., Piergiovanni L., 2008. Assessment of two different rapid compression tests for the evaluation of texture differences in osmo-air-dried apple rings. *Journal of Food Engineering*, 88, 484–491.
- Feng H., Tang J., 1998. Microwave finish drying of diced apples in spouted bed. *Journal of Food Science*, 63(4), 679–683.
- Fidos M., 2006. Wpływ parametrów mikrofalowo-podciśnieniowego suszenia selera korzeniowego na przebieg procesu i wybrane cechy jakościowe produktu. Praca doktorska, AR Wrocław.

- Figiel A., Szarycz M., Żygadło K., 2006. Rehydracja i wytrzymałość na ściskanie miąższu buraka ćwikłowego wysuszonego metodą mikrofalową w warunkach obniżonego ciśnienia. *Inżynieria Rolnicza*, 2(77), 299–305.
- Frączek J., Mudry K., 2006. Metoda określenia oporów cięcia pędów wierzby energetycznej. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 91–98.
- Fry S.C., 1988. The growing plant cell wall. *Chemical and Metabolic Analysis*, Longman Scientific & Technical, Harlow.
- Gawałek J., 2005. Wpływ warunków konwekcyjnego i sublimacyjnego suszenia korzeni marchwi na jakość suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 119–127.
- George J.P., Datta A.K., 2002. Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. *Journal of Food Engineering*, 52, 89–93.
- Gerschenson L.N., Rojas A.M., Marangoni A.G., 2001. Effects of processing on kiwi fruit dynamic rheological behaviour and tissue structure. *Food Research International*, 34, 1–6.
- Ghosh P.K., Agrawal Y.C., Jayas D.S., Kumghar B.K., 2004. Mass transfer kinetics model of osmotic dehydration of carrots. *Transaction of the ASAE*, 47(4), 1179–1185.
- Giri S.K., Prasad S., 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78, 512–521.
- Gołacki K., 1996. Prędkość i energia w procesie deformacji materiału roślinnego na przykładzie korzeni marchwi. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 425, 61–66.
- Gołacki K., 2001. Nowe możliwości wykorzystania charakterystyk lepkosprężystych materiałów pochodzenia roślinnego. *Inżynieria Rolnicza* 2(22), 69–75.
- Gołacki K., Graboś A., Stropek Z., 1999a. Korekcja błędów systematycznych w teście relaksacji naprężeń materiału pochodzenia roślinnego. *Inżynieria Rolnicza*, 1(7), 111–117.
- Gołacki K., Stropek Z., Graboś A., 1999b. Test relaksacji naprężeń w materiale biologicznym w warunkach obciążenia dynamicznego – realizacja techniczna. *Inżynieria Rolnicza*, 2(8), 55–61.
- Gołacki K., Obroślak R., 1998. Wyznaczanie współczynnika Poissona korzeni marchwi. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 454, 221–227.
- Gołacki K., Stankiewicz A., Stropek Z., 2005. Wpływ prędkości deformacji na wybrane charakterystyki lepkosprężystych materiałów roślinnych. *Acta Agrophysica*, 5(3), 645–655.
- Gołacki K., Stropek Z., 2001. Viscoelastic properties of Jonagold apple flesh. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 4(2), series: Agricultural Engineering.
- Gomez G.F., Sjöholm I., 2004. Applying biochemical and physiological principles in the industrial freezing of vegetables: a case study on carrots. *Trends of Food Science & Technology*, 15, 39–43.
- Góral D., Kluza F., 2009. Cutting test application to general assessment of vegetable texture changes caused by freezing. *Journal of Food Engineering*, 95, 346–351.

- Górnicki K., Kaleta A., 2007a. Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition. *Journal of Food Engineering*, 82, 160–170.
- Górnicki K., Kaleta A., 2007b. Modelling convection drying of blanched parsley root slices. *Biosystems Engineering*, 97, 51–59.
- Gunasekaran S., 1999. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technology*, 17(3), 395–412.
- Hall J.L., Flowers T.J., Roberts R.M. 1982. *Struktura i metabolizm komórek roślinnych*. PWN, Warszawa.
- Henry Z.A., Zhang H., Onks D.O., 2000. New model for elastic behaviour of cellular material. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, 399–408.
- Horubała A., 1975. *Podstawy przechowywania żywności*. PWN, Warszawa.
- Hörsten D., Kartnig T., 1999. Aufbereitung von Arzneipflanzen mittels Mikrowellenenergie *Landtechnik*, 54(4), 206–207.
- Hsu C.L., Chen W., Weng Y.M., Tseng C.Y., 2003. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry*, 83, 85–92.
- Jakubczyk E., Ksionek U., 2006. Właściwości mechaniczne suszów jabłkowych o średniej zawartości wody. *Inżynieria Rolnicza*, 7(82), 215–222.
- Jakubczyk E., Lewicki P.P., 2002. Wpływ zabiegów wstępnych przed suszeniem na właściwości mechaniczne suszów jabłek. *Inżynieria Rolnicza*, 5(38), 431–439.
- Jakubczyk E., Lewicki P.P., 2003. Właściwości mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej struktury. *Acta Agrophysica*, 2(3), 549–557.
- Jakubczyk E., Uziak D., 2005. Charakterystyka instrumentalnych metod badania właściwości mechanicznych wybranych owoców i warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 181–189.
- Jałoszyński K., 2003. *Analiza mikrofalowego suszenia wybranych warzyw w warunkach obniżonego ciśnienia*. Praca doktorska, AR Wrocław.
- Janowicz M., Lenart A., 2005. Wpływ wstępnego odwadniania osmotycznego na współczynnik dyfuzji wody w tkance jabłek suszonych konwekcyjnie. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 191–199.
- Janowicz M., Lenart A., Idzikowska W., 2006. Wpływ parametrów obróbki osmotycznej na kinetykę adsorpcji pary wodnej przez liofilizowane truskawki. *Acta Agrophysica*, 8(4), 851–862.
- Janowicz L., 1999. *Transport ciepła i masy podczas konwekcyjnego suszenia jabłek*. Praca doktorska, AR Wrocław.
- Jaros M., 1999. *Kinetyka suszenia warzyw*. Rozprawa habilitacyjna nr 224, Wydawnictwo AR w Lublinie.
- Kaleta A., 1999. Metody obróbki wstępnej stosowane w procesie konwekcyjnego suszenia warzyw i owoców. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 7(3), 43–56.
- Kaleta A., Górnicki K., Kościkiewicz A., 2006. Wpływ parametrów suszenia pod obniżonym ciśnieniem na właściwości rehydratacyjne suszu z korzenia pietruszki i cechy organoleptyczne rehydratowanego suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 3(78), 79–87.

- Kaleta A., Górnicki K., Siwińska U., 2005. Wpływ metod obróbki wstępnej stosowanych w procesie konwekcyjnego suszenia na kinetykę rehydracji suszu z korzenia pietruszki. *Acta Scientiarum Poloniarum, Technica Agraria*, 4(1), 19–28.
- Kamst G.F., Bonazzi C., Vasseur J., Bimbenet J.J., 2002. Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grain. *Transaction of the ASAE*, 45(1), 145–151.
- Karathanos V.T., Kanellopoulos N.K., Belessiotis V.G., 1996. Development of porous structure during air drying of agricultural plan products. *Journal of Food Engineering*, 29, 167–183.
- Karel M., 1980. Teoria procesów suszenia. Nowe metody zagęszczania i suszenia żywności (red. A. Spicer). WNT, Warszawa, 53–100.
- Kaya A., Aydin O., Demirtas C., 2007. Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering*, 96, 517–524.
- Kendall P., DiPersio P., Sofos J., 1998. Drying vegetables. Food and Nutrition Series, Preparation, No.9.308, Colorado State University.
- Khraisheh M.A.M., Mcminn W.A.M., Magee T.R.A., 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Research Food International*, 37, 497–503.
- Klimczak J., Irzyniec Z., 1994a. Blanszowanie warzyw. Kryteria wyboru warunków i metod prowadzenia procesu. cz. I. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*, 9/94, 25–26.
- Klimczak J., Irzyniec Z., 1994b. Blanszowanie warzyw. Kryteria wyboru warunków i metod prowadzenia procesu. cz. II. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*, 11/94, 19–20.
- Kneule F., 1970. Suszenie. Arkady, Warszawa.
- Kolowca J., 2004. Właściwości lepkosprężyste korzeni buraków i roślin warzywnych. *Inżynieria Rolnicza*, 3(58), 239–243.
- Kolowca J., 2005. Właściwości reologiczne mięszu jabłek o zróżnicowanej strukturze. *Inżynieria Rolnicza*, 6(66), 355–359.
- Kolowca J., 2006a. Właściwości reologiczne masy ziarna o zróżnicowanej wilgotności. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 243–248.
- Kolowca J., 2006b. Wpływ wielokrotnych obciążeń statycznych na stopień zagęszczenia i właściwości reologiczne masy ziarna. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 193–199.
- Kolowca J., Krzysztofik B., Nawara P., 2006. Wpływ czasu przechowywania na właściwości reologiczne bulw ziemniaka. *Acta Agrophysica*, 7(1), 99–104.
- Konieczna M., Szarycz M., 1998a. Makrouszkodzenia nasion bobiku suszonych konwekcyjnie i mikrofalowo-konwekcyjnie. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 454, 545–552.
- Konieczna M., Szarycz M., 1998b. Uszkodzenia biologiczne nasion bobiku spowodowane suszeniem mikrofalowo-konwekcyjnym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 454, 553–559.
- Kowalska H., Lenart A., 2005. Zmiany struktury tkanki roślinnej wywołane odwadnianiem osmotycznym. *Inżynieria Rolnicza*, 9(69), 187–195.

- Kowalska H., Lenart A., 2001. Mass Exchange during osmotic pretreatment of vegetables. *Journal of Food Engineering*, 49, 137–140.
- Kowalski J.K., Rajewska K., Rybicki A., 2003. Suszenie konwekcyjne i mikrofalowe: jakość materiału suszonego oraz zużycie energii. X Sympozjum Suszarnictwa, Łódź, 359–366.
- Kramkowski R., 1998. Analiza suszenia sublimacyjnego wybranych surowców spożywczych. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu*, 333, Rozprawy CLIII.
- Kramkowski R., Gawlik P., Banasik K., Czachor G., 2001a. Kinetyka rehydracji warzyw korzeniowych suszonych sublimacyjnie. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 137–143.
- Kramkowski R., Gawlik P., Peroń S., 2001b. Wykorzystanie różnicowej kalorymetrii skaningowej do określenia optymalnych parametrów suszenia sublimacyjnego selera korzeniowego. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 145–151.
- Kramkowski R., Paślawska M., Peroń S., 2001c. Ocena wpływu suszenia sublimacyjnego na cechy wytrzymałościowe selera korzeniowego. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 161–167.
- Kramkowski R., Peroń S., Stępień B., 2002a. Modyfikacja mechanicznych właściwości warzyw pod wpływem suszenia sublimacyjnego. *Inżynieria Rolnicza*, 6(39), 339–346.
- Kramkowski R., Stępień B., Banasik K., 2002b. Wpływ suszenia sublimacyjnego na wybrane właściwości mechaniczne pieczarek. *Acta Scientiarum Poloniarum, Technica Agraria*, 1(1), 5–12.
- Kramkowski R., Stępień B., Krajewski M., 2003a. Wpływ czasu przechowywania suszu z pieczarek uzyskanego metodą sublimacyjną na pracę ściskania. *Inżynieria Rolnicza*, 9, 147–153.
- Kramkowski R., Stępień B., Peroń S., 2003b. Selected aspects of freeze-drying in the production of instantly reconstituable foodstuffs. *Acta Agrophysica*, 2(2), 339–346.
- Kramkowski R., Szarycz M., Stępień B., Fidos M., 2003c. Investigation into the rehydration of microwave dried carrot under reduced pressure. *Acta Agrophysica*, 2(2), 331–338.
- Krokida M.K., Karathanos V.T., Maroulis Z.B., 1999. Viscoelastic behaviour of dehydrated products during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 40, 269–277.
- Krokida M.K., Marinos-Kouris D., 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57, 1–7.
- Krzykowski A., Rydzak L., 2001. Skurcz objętościowy i zmiany gęstości marchwi w procesie konwekcyjnego suszenia. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 147–151.
- Leeratanarak N., Devahastin S., Chiewchan N., 2006. **Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques.** *Journal of Food Engineering*, 77, 635–643.
- Lenart A., 1976. Osmotyczne odwadniania produktów spożywczych. *Przemysł Spożywczy*, Tom XXX, 86–88.
- Lentas K., Witrowa-Rajchert D., 2009. Wpływ parametrów blanszowania na właściwości mechaniczne i barwę suszu korzeni selera. *Acta Agrophysica*, 13(1), 165–174.
- Lewicki P.P., 1998. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36, 81–87.

- Lewicki P.P., 1999. Właściwości wody w produktach spożywczych. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, z. 24, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 811, 29–46.
- Lewicki P.P., Gondok E., Witrowa-Rajchert D., Nowak D., 2001. Effect of drying on respiration of apple slices. *Journal of Food Engineering*, 49, 333–337.
- Lewicki P.P., Jakubczyk E., 2004. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64, 307–314.
- Lewicki P.P., Łukaszuk A., 2000. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering*, 45, 119–126.
- Lewicki P.P., Porzecka-Pawlak R., 2005. Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering*, 66, 43–50.
- Lewicki P.P., Vou Le H., Pomarańska-Łazuka W., 2002. Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 54, 141–146.
- Liapis A.I., Sadikoglu H., 1997. Mathematical modeling of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze-drying in trays: parameter estimation and model discrimination by comparison of the theoretical results with experimental data. *Drying Technology*, 15(3–4), 791–819.
- Lin T.M., Durance T.D., Scaman C.H., 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2), 111–117.
- Lis H., Lis T., 2001. Wpływ zabiegów wstępnych i warunków suszenia śliwek na czas procesu oraz cechy jakościowe suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 13(33), 268–273.
- Lis T., Lis H., Kołoczek E., 2004. Zależność cech jakościowych liofilizatu, czasu suszenia i zużycia energii od jego wilgotności. *Acta Agrophysica*, 4(3), 747–752.
- Lis T., Ziemska A., Lis M.M., 2005. Wpływ temperatury suszenia pietruszki na przebieg procesu i cechy jakościowe suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 3(63), 307–316.
- Litvin S., Mannheim C.H., Milcz J., 1998. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 36, 103–111.
- Łapczyńska-Kordon B., 2000. Zmiany gęstości i struktury wewnętrznej selera podczas suszenia. *Inżynieria Rolnicza*, 7(18), 91–98.
- Łapczyńska-Kordon B., 2005. Analiza zmian struktury wewnętrznej podczas konwekcyjnego suszenia pietruszki. *Inżynieria Rolnicza*, 10(70), 285–293.
- Łoś-Koczera M., 1991. Składniki i wartość odżywcza produktów spożywczych. PZWL, Warszawa.
- Marabi A., Thieme U., Jacobson M., Saguy I.S., 2006. Influence of drying method and rehydration time on sensory evaluation of rehydrated carrot particulates. *Journal of Food Engineering*, 72, 211–217.
- Markowski M., 1997. Air drying of vegetables: evaluation of mass transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*, 34, 55–62.
- Martinez V.Y., Nieto A.B., Castro M.A., Salvatori D., Alzamora S.M., 2007. Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 83, 394–403.
- Marzec A., Pasik Sz., 2008. Wpływ metody suszenia na właściwości mechaniczne i akustyczne suszy marchwiowych. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99), 291–296.

- Maskan M., 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71–78.
- Maskan M., 2001a. Kinetics of colour change of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169–175.
- Maskan M., 2001b. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177–182.
- Mastrocola D., Dalla Rosa M., Massini R., 1997. Freeze-dried strawberries rehydrated in sugar solution: mass transfers and characteristics of final products. *Food Research International*, 30(5), 359–364.
- Mayer-Miebach E., Speiss W.E.L., 2003. Influence of cold storage and blanching on the carotenoid content of *Kintoki* carrots. *Journal of Food Engineering*, 56, 211–213.
- Mazza G., 1983. Effect of pre-drying on moisture transport and product quality. *Journal of Food Technology*, 18, 113–123.
- McGarry A., 1995. Cellular basis of tissue toughness in carrot. *Storage roots. Annals of Botany*, 75, 157–163.
- Mickley H.S., Sherwood T.K., Reed C.E., 1957. *Applied mathematics in chemical engineering*. McGraw-Hill Book Co., NY.
- Molenda M., Montross M.D., Horabik J., Ross I.J., 2002. Mechanical properties of corn and soybean meal. *Transaction of the ASAE*, 45(6), 1929–1936.
- Moreno J., Chiralt A., Escriche I., Serra J.A., 2000. Effect of blanching/osmotic dehydration combined methods on quality and stability of minimally processed strawberries. *Food Research International*, 33, 609–616.
- Mui W.W.Y., Durance T.D., Scaman Ch.H., 2002. Flavor and texture of banana chips dried by combinations of hot air, vacuum, and microwave processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(7), 1883–1889.
- Murakowski J., 1994. Suszenie pieczarek w warunkach konwekcji naturalnej – badania skurczu suszonych obiektów. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 417, 145–155.
- Nawirska A., Figiel A., Kucharska A.Z., Sokół-Lętowska A., Biesiada A., 2009. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. *Journal of Food Engineering*, 94, 14–20.
- Nayak Ch. A., Suguna K., Rastogi N.K., 2006. Combined effect of gamma-irradiation and osmotic treatment on mass transfer during rehydration of carrots. *Journal of Food Engineering*, 74, 134–142.
- Nowak D., Krzywoszyński P., 2007. Wpływ surowca i sposobu prowadzenia procesu na właściwości fizyczne otrzymanego suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 5(93), 305–312.
- Nowak D., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P., 1998. Skurcz objętościowy i zmiana gęstości marchwi i ziemniaka podczas suszenia konwekcyjnego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 454, 461–468.
- Olaniyan A.M., Oje K., 2002. Some aspects of the mechanical properties of shea nut. *Biosystems Engineering*, 81(4), 413–420.
- Pabis S., 1965. *Suszenie płodów rolnych*. PWRiL, Warszawa.
- Pabis S., 1982. *Teoria konwekcyjnego suszenia płodów rolniczych*. PWRiL, Warszawa.
- Pabis S., 1984. *Technologia suszenia i czyszczenia nasion*. PWRiL, Warszawa.

- Pabis S., 1994. Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 417, 15–34.
- Pabis S., 1999. The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 72, 187–195.
- Pabis S., Jaros M., 2002. The first period of convection drying of vegetables and the effect of shape-dependent shrinkage. *Biosystems Engineering*, 81, 201–211.
- Pearce R.S., 2001. Plant freezing and damage. *Annals of Botany*, 87, 417–424.
- Peleg M., 1979. Characterization of the stress relaxation curves of solid food. *Journal of Food Science*, 44, 227–281.
- Peleg M., 1980. Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials. *Journal of Rheology*, 24(4), 451–463.
- Pere C., Rodier E., Schwartzentruber J., 1998. Effects of the structure of a porous material on drying kinetics in a microwave vacuum laboratory scale dryer. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium, 1922–1929*.
- Pereira N.R., Marsaioli Jr.A., Ahrne L.M., 2007. Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81, 79–87.
- Pluta M., 1982. *Mikroskopia optyczna*. PWN, Warszawa.
- Prabhanjan D.G., Ramaswamy H.S., Raghavan G.S.V., 1995. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25, 283–293.
- Prakash S., Jha S.K., Datta N., 2004. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*, 62, 305–313.
- Prothon F., Ahrne L.M., Funebo T., Kidman S., Langton M., Sjöholm I., 2001. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *Liebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 34, 95–101.
- Przestalski S., 1983. *Błony biologiczne*. Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Rahman M.S., Sablani S.S., Al-Ruzeiqi M.H., Guizani N., 2002. **Water absorption isotherms of freeze-dried tuna meat**. *Transaction of the ASAE*, 45(3), 767–772.
- Rastogi N.K., Nayak C.A., Raghavarao K.S.M.S., 2004. Influence of osmotic pre-treatment on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering*, 65, 287–292.
- Rowicka R., Nowak D., Lewicki P.P., 2002. Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne kostek jabłka suszonych sublimacyjnie. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 1(30), 66–77.
- Sacilik K., Unal G., 2005. Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices. *Biosystems Engineering*, 92, 207–215.
- Salagnac P., Glouannec P., Lecharpentier D., 2004. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 4479–4489.
- Sanga E.C.M., Mujumdar A.S., Raghavan G.S.V., 2002. Simulation of convection-microwave drying for shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 487–499.

- Severini C., Baiano A., De Pilli T., Carbone B.F., Derossi A., 2005. Combined treatment of blanching and dehydration: study on potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 68, 289–296.
- Sham P.W.Y., Scaman Ch., Durance T.D., 2001. 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.
- Shi X., Datta A.K., Throop J.A., 1998. Mechanical property changes during freezing of a biomaterial. *Transaction of the ASAE*, 41(5), 1407–1414.
- Skorupska E., 2005. Badanie procesu suszenia konwekcyjnego pietruszki korzeniowej. *Inżynieria Rolnicza*, 9(69), 313–320.
- Sokhansanj S., Yayas D., 1995. Drying of Foodstuff, in "Handbook of Industrial Drying" vol.1, A.S. Mujumdar (ed), Marcel Dekker, New York, 589–625.
- Stępień B., 1996. Badania cech reologicznych ziarna pszenżyta w oparciu o pętlę histerezy odkształceń. Praca doktorska, AR Wrocław.
- Stępień B., 2005. Badania wybranych cech mechanicznych marchwi suszonej sublimacyjnie. *Inżynieria Rolnicza*, 4(64), 271–279.
- Stępień B., 2006. Zmiany wytrzymałości na ściskanie pietruszki suszonej różnymi metodami. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 191–198.
- Stępień B., 2007a. Impact of the drying method on the carrot cutting process course. *Acta Agrophysica*, 9(1), 225–267.
- Stępień B., 2007b. Wpływ metody suszenia na rehydrację selera. *Inżynieria Rolnicza*, 8(96), 255–263.
- Stępień B., 2008a. Impact of vacuum-microwave drying on selected mechanical and rheological features of carrot. *Biosystems Engineering*, 99, 234–238.
- Stępień B., 2008b. Rehydration of carrot dried using various methods. *Acta Agrophysica*, 11(1), 239–251.
- Stępień B., Michalski A., 2006. Zmiany cech mechanicznych zachodzące w trakcie przechowywania suszonej pietruszki. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 199–206.
- Stępień B., Kramkowski R., Figiel A., 2003. Wpływ temperatury suszenia sublimacyjnego na właściwości reologiczne selera. *Inżynieria Rolnicza*, 9(51), 155–162.
- Stopa R., 2002. Maksymalne naprężenia stykowe dla korzeni marchwi wyznaczone w próbie ściskania promieniowego. *Inżynieria Rolnicza*, 5(38), 377–385.
- Stopa R., Romański L., Niemiec A., 2006. Wpływ kształtu rdzenia w dwuwarstwowych modelach przekroju poprzecznego korzeni marchwi na obrazy izochrom. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 215–222.
- Stropek Z., Gołacki K., 2006. Metoda porównania przebiegów krzywych relaksacji naprężeń różnych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 473–479.
- Strumiłło Cz., 1983. Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa.
- Strumiłło Cz., Kudra T., 1986. *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach Science Publisher, New York.
- Sumnu G., Turabi E., Oztop M., 2005. Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens. *Liebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 38, 549–553.

- Surma M., Peroń S., Krajewski M., 2006. Wpływ blanszowania na rehydrację pietruszki korzeniowej suszonej sublimacyjnie. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 223–228.
- Szarycz M., 1999. Aspekty energetyczne suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego na przykładzie suszenia nasion bobiku. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 25, 189–195.
- Szarycz M., 2001. Matematyczne modelowanie mikrofalowo-konwekcyjnego suszenia surowców rolniczych na przykładzie jabłek. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu Nr 420, Rozprawy CLXXXIII*.
- Szarycz M., Fidos M., Jałoszyński K., 2006. Wpływ zakresu ciśnień podczas suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem selera korzeniowego na kinetykę procesu i pracę cięcia rehydrowanego materiału. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 239–246.
- Szarycz M., Kamiński E., Jałoszyński K., Szponarska A. 2003. Analiza mikrofalowego suszenia pietruszki w warunkach obniżonego ciśnienia. Cz. II. Skurcz suszarniczy i rehydracja suszu, *Technica Agraria*, 2(2), 29–36
- Szarycz M., Kramkowski R., 2001. Efekty zastosowania mikrofal w suszarnictwie żywności. *Materiały Konferencyjne, Nowoczesne technologie, wyposażenie i usługi dla podnoszenia konkurencyjności przetwórci rolno-spożywczych, w tym MSP*, 2(15), Pleszew, 99–106.
- Szarycz M., Kramkowski R., Kamiński E., 2002a. Zastosowanie mikrofal do suszenia produktów spożywczych – cz. I. Konsekwencje sterowania mocą mikrofal, *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2, 47–54.
- Szarycz M., Kramkowski R., Kamiński E., 2002b. Zastosowanie mikrofal do suszenia produktów spożywczych – cz. II. Podstawy teoretyczne, praktyczne możliwości zastosowań, *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2, 55–64.
- Szarycz M., Szponarska A., Jaroszyński K., 2003. Influence on the preliminary preparation of parsley cubes on the process of drying them in a microwave at reduces pressure. *Acta Agrophysica*, 2(2), 425–431.
- Szot B., Gołacki K., 1987. Ocena właściwości mechanicznych korzeni marchwi na podstawie pomiarów podstawowych parametrów wytrzymałościowych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 321, 175–183.
- Szot B., Kęsik T., Gołacki K., 1987. Badanie zmienności właściwości mechanicznych korzeni marchwi w zależności od cech odmianowych, czynników agrotechnicznych i okresu przechowywania. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 316, 227–244.
- Tan D.L.S., Miyamoto K., Ishibashi K., Matsuda K., Satow T., 2001. Thin-layer drying of sweet potato chips and pressed grates. *Transactions of the ASAE*, 44(3), 669–674.
- Temple S.J., van Boxel A.J.B., 1999. Thin layer drying of black tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 167–176.
- Thiel B.L., Donald A.M., 1998. Mechanical testing of fully hydrated carrots in the environmental SEM. *Annual of Botany*, 82, 727–733.
- Tijsskens L.M.M., Rodis P.S., Hertog M.L.A.T.M., Waldron K.W., Ingram L., Progenia N., van Dijk C., 1997. Activity of peroxidase during blanching of peaches, carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 34, 355–370.

- Torrington E., Esveld E., Scheewe I., van den Berg R., Bartels P., 2001. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 49, 185–191.
- Verlinden B.E., De Baerdemaeker J., 1997. Modelling low temperature blanched carrot firmness based on heat introduced processes and enzyme activity. *Journal of Food Science*, 62, 213–229.
- Viswanathan R., Gothandapani L., 1999. Pressure density relationships and relaxation characteristics of coir pith. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73, 217–225.
- Wang J., 2003. Anisotropic relaxation properties of pear. *Biosystems Engineering*, 85(1), 59–65.
- Wang J., Xi Y.S., 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*, 68, 505–511.
- Witrowa-Rajchert D., 1999. Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. Rozprawa habilitacyjna, Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa.
- Witrowa-Rajchert D., 2003. Badanie zmian objętości suszonej tkanki roślinnej podczas rehydracji. *Acta Agrophysica*, 2(4), 867–878.
- Witrowa-Rajchert D., Radecka-Wierzbicka M., 2005. Wpływ techniki suszenia konwekcyjnego na wybrane wyznaczniki jakości suszonej tkanki roślinnej. *Inżynieria Rolnicza*, 9(69), 387–395.
- Wojtaszek P., Woźny A., Ratajczak L., 2006. *Biologia komórki roślinnej*. Tom 1, Struktura. PWN, Warszawa.
- Wojtaszek P., Woźny A., Ratajczak L., 2007. *Biologia komórki roślinnej*. Tom 2, Funkcja. PWN, Warszawa.
- Woźny A., Michejda J., Ratajczak L., 2001. *Podstawy biologii komórki roślinnej*. Wydawnictwo Naukowe WAM, Poznań.
- Yao Z., Le Maguer M., 1996. Osmotic Dehydration: an analysis of fluxes and shrinkage in cellular structure. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 2211–2216.
- Zhao Y.P., Chang K.C., 1995. Sulphite and starch effect colour and carotenoids of dehydrated carrots (*Daucus carota*) during storage. *Journal of Food Science*, 60, 324–326.

MODYFIKACJA CECH MECHANICZNYCH I REOLOGICZNYCH WYBRANYCH WARZYW POD WPLYWEM RÓŻNYCH METOD SUSZENIA

Streszczenie

Trzy popularne warzywa korzeniowe (marchew, pietruszkę i seler) suszono, wykorzystując trzy metody: konwekcyjną, sublimacyjną i mikrofalową w warunkach obniżonego ciśnienia. Badania wykonano dla surowców wstępnie blanszowanych, odwodnionych osmotycznie oraz niepoddanych obróbce wstępnej. Badania wytrzymałościowe wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566, stosując głowice klasy 0,5. Testy wytrzymałości na ściskanie, przecinanie oraz relaksację naprężeń wykonano dla surowców, suszy i materiałów ponownie uwodnionych. Uzyskiwane produkty badano bezpośrednio po suszeniu oraz po 6, 12 i 18 miesiącach przechowywania. Obliczono wartości pracy ściskania oraz przecinania. W oparciu o testy relaksacji naprężeń obliczono wartości wskaźników opisujących zmiany sprężystości badanych materiałów. Wykonano zdjęcia mikroskopowe struktury wewnętrznej surowców, suszy i materiałów po ponownym uwodnieniu.

Sformułowano trzy hipotezy mówiące o związku pomiędzy zmianami struktury wewnętrznej badanych materiałów oraz ich cechami mechanicznymi i reologicznymi. Analiza wyników badań wykazała istotny wpływ metody suszenia, a także obróbki wstępnej na cechy mechaniczne i reologiczne suszonych warzyw. Zastosowanie odpowiedniej kombinacji metody suszenia i obróbki wstępnej pozwala istotnie zmieniać jakość uzyskiwanych produktów.

Przechowywanie suszy przez okres 18 miesięcy nie powoduje istotnych zmian w zakresie cech mechanicznych i reologicznych.

Produkty suszenia konwekcyjnego charakteryzują się obniżoną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do produktów otrzymanych metodą sublimacyjną lub mikrofalową w warunkach obniżonego ciśnienia. Suszenie sublimacyjne prowadzi do uzyskania produktów o obniżonej wytrzymałości na przecinanie zarówno dla suszy, jak i materiałów ponownie uwodnionych.

Stwierdzono, że blanszowanie surowców powoduje wzrost elastyczności oraz wytrzymałości na ściskanie suszy i materiałów rehydrowanych. Odwodnienie osmotyczne osłabia strukturę wewnętrzną produktów, przez co obniża się odporność na ściskanie.

Elastyczność suszy po ponownym uwodnieniu jest znacznie niższa od elastyczności surowców.

Zdjęcia mikroskopowe surowców przedstawiają grube, uwodnione ściany tworzące komórki o regularnym kształcie. Ściany komórkowe suszy uzyskanych metodą sublimacyjną są cienkie, postrzępione, z licznymi ubytkami. Deformacje struktury wewnętrznej powodowane suszeniem konwekcyjnym są znacznie większe i prowadzą do uzyskania produktów o komórkach ciasno upakowanych ze ścianami bardzo zmienionymi w stosunku do budowy ścian komórek surowców.

Słowa kluczowe: suszenie, warzywa korzeniowe, rehydracja, reologia, cechy mechaniczne

MODIFICATION OF MECHANICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES FOR SELECTED VEGETABLES OCCURRED DURING DRYING USING DIFFERENT METHODS

S u m m a r y

Three, very popular, root vegetables (carrot, parsley and celery) were dried by using three methods: convection drying, freeze-drying and vacuum-microwave drying. The testing was performed on materials that were initially blanched, osmotically dehydrated, and untreated before drying. A strength-testing machine, type Instron 5566, with measuring heads of class 0.5 was used for the testing. The stress relaxation, resistance to compression and cutting tests were performed for raw, dried and rehydrated material. All tests were made just after drying and for material stored 6, 12 and 18 months. The values of the cutting and compression work were calculated. The stress relaxation test was used to calculate indexes that describe elasticity of dried products. Scanning microscope was used to take a microscope photographs of the internal structure.

Three hypothesis about relationship between internal structure of dried material and mechanical and rheological properties were confirmed. An analysis of the results has shown that there is a significant impact of the drying method and preliminary treatment on the mechanical and rheological properties of dried vegetables. It is possible to modify quality of dried product by using suitable combination of drying method and preliminary treatment.

Storage of dried products during 18 months leads to obtain product without essential changes of mechanical and rheological properties.

Convection drying is a method that allow to obtain a product with decreased resistance to compression with respect to product received using freeze-drying or vacuum-microwave drying. Freeze-drying resulted in decreased cutting strength of dried and rehydrated vegetables.

It was found that blanching operation resulted in increase of compression strength and elasticity of dried an rehydrated materials. Osmotic dehydration leads to weakening of product internal structure and causes decrease of resistance to compression.

The elasticity of rehydrated product is much lower compared with elasticity of raw vegetables.

Microscope photographs of raw vegetables presents thick, hydrated walls that form cells of regular shape. The cellular walls of the dried material obtained with the

freeze-drying method are thin, fuzzy, with visible losses. Deformation of the internal structure caused by the convection drying is much higher and leads to obtain cellular walls much changed in relation to the raw vegetables with tightly packed groups of cells.

Key words: drying, root vegetables, rehydration, rheology, mechanical properties

ZAŁĄCZNIK

TABELE WYNIKÓW

Tabela Z1 Table Z1

Wartości pracy ściskania i pracy przecinania suszu z marchwi
Compression work and cutting work values for dried carrot

		MARCHEW – SUSZ – CARROT – DRIED MATERIAL																							
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage						6 miesięcy przechowywania 6 months of storage						12 miesięcy przechowywania 12 months of storage						18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
		P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD				
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	10,78	1,45	644,7	16,8	9,84	1,72	1055,5	31,6	6,02	0,79	679,7	54,4	14,12	3,65	1119,6	31,7								
	blanszowanie (BL) blanching	26,42	1,77	1580,7	23,0	9,22	0,74	1168,3	72,6	6,88	0,86	2178,4	56,2	21,46	1,95	1385,6	50,3								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	3,57	0,37	885,0	37,0	2,39	0,36	841,7	56,4	2,41	0,17	999,4	42,5	4,79	0,35	1058,6	79,2								
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	218,7	32,51	450,6	30,2	37,14	2,38	490,8	37,1	25,18	1,89	300,3	26,7	13,03	1,31	576,4	17,4								
	blanszowanie (BL) blanching	239,4	17,73	130,0	10,0	18,73	0,38	374,1	22,0	29,53	1,76	364,7	9,8	23,72	0,97	385,3	23,1								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	13,71	1,80	416,7	28,3	10,41	0,32	395,5	21,0	6,93	1,11	464,7	12,3	7,90	0,55	443,3	27,3								
Suszenie mikrofalowo- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	96,90	8,79	951,0	39,8	29,81	1,08	1607,2	61,4	24,56	0,60	1397,9	41,4	11,95	3,97	1840,5	68,9								
	blanszowanie (BL) blanching	188,8	23,16	428,9	7,2	24,79	2,40	1092,2	34,5	26,30	1,48	673,1	29,4	21,69	1,23	893,5	23,4								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	41,40	10,22	1291,5	38,8	15,49	0,48	1000,7	29,7	17,26	1,04	1339,1	73,0	8,54	0,80	1591,2	39,9								

Wartości pracy ściskania i pracy przecinania marchwi ponownie uwodnionej
Compression work and cutting work values for rehydrated carrot

		MARCHEW – MATERIAL UWODNIONY – CARROT – REHYDRATED MATERIAL																	
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage								
Suszenie konwekcyjne (SK)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	P _c	SD	Pp	SD	P _c	SD	Pp	SD	P _c	SD	Pp	SD	P _c	SD	Pp	SD		
		mJ	mJ·cm ⁻²	mJ·cm ⁻²	mJ	mJ·cm ⁻²	mJ	mJ·cm ⁻²	mJ·cm ⁻²	mJ	mJ·cm ⁻²	mJ	mJ·cm ⁻²	mJ·cm ⁻²	mJ	mJ·cm ⁻²	mJ·cm ⁻²	mJ·cm ⁻²	
Suszenie konwekcyjne (SK)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	5,66	0,24	201,7	11,2	10,46	0,72	195,7	14,6	6,12	0,38	238,1	26,4	10,52	0,44	261,3	39,3		
	blanszowanie (BL) blanching	8,65	0,56	437,2	12,4	9,25	0,24	362,8	23,5	7,06	0,52	483,0	27,2	20,74	1,39	476,8	33,4		
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	3,48	0,23	508,4	23,6	2,39	0,36	392,5	11,8	2,46	0,30	414,8	24,1	4,86	0,35	488,8	22,4		
Suszenie sublimacyjne (SS)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	20,07	1,16	209,6	8,50	8,42	0,93	174,8	16,4	20,85	0,82	195,6	15,0	13,19	1,31	199,8	13,6		
	blanszowanie (BL) blanching	13,19	0,82	142,5	17,5	10,02	0,87	153,3	15,9	30,13	0,97	194,8	16,7	23,89	0,90	145,0	8,90		
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	12,64	1,02	185,8	16,9	7,44	0,51	246,3	12,3	6,92	0,64	202,1	14,6	7,65	0,19	221,1	16,8		
Suszenie mikrofalowe (SMP)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	10,00	0,63	380,2	13,7	9,31	0,24	301,2	13,2	4,10	0,53	305,5	22,3	10,55	0,97	314,9	12,9		
	blanszowanie (BL) blanching	7,89	0,68	276,8	18,1	25,36	0,78	404,8	16,0	4,11	0,40	276,8	12,6	24,28	1,39	231,9	18,9		
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	7,04	0,48	363,8	20,0	15,79	0,26	366,7	12,9	7,49	0,50	269,6	19,5	8,40	0,82	381,5	19,9		
Surowiec – Raw material		P _c = 1612,0			SD = 47,2;			P _p = 183,8			SD = 9,0								

Tabela Z3 Table Z3

Wartości pracy ściskania i pracy przecinania suszu z pietruszki
Compression work and cutting work values for dried parsley

	PIETRUSZKA – SUSZ – PARSLEY – DRIED MATERIAL																							
	0 miesięcy przechowywania 0 months of storage						6 miesięcy przechowywania 6 months of storage						12 miesięcy przechowywania 12 months of storage						18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD				
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	21,01	1,14	533,8	24,5	12,95	0,76	465,2	35,8	13,10	0,57	481,4	89,2	13,89	0,85	675,5	27,4							
	blanszowanie (BL) blanching	8,24	0,68	1253,4	75,7	11,13	0,26	1332,2	81,7	18,80	0,44	1470,6	55,9	31,10	1,25	1693,6	47,7							
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	8,63	0,37	859,1	35,6	4,73	0,24	864,3	52,4	6,04	0,63	919,5	75,2	5,07	0,29	1004,4	49,9							
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	299,1	10,20	214,2	22,9	92,40	4,35	299,5	18,5	153,8	10,60	359,2	31,6	58,59	4,35	484,2	32,4							
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	blanszowanie (BL) blanching	242,3	23,20	368,8	21,1	80,24	8,56	523,3	21,3	115,1	6,29	418,9	44,1	30,78	1,37	643,5	34,4							
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	185,9	5,21	164,7	14,8	15,09	1,71	641,8	25,1	22,50	0,71	693,2	34,6	17,06	0,92	1082,7	68,9							
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	159,3	8,32	410,7	37,6	64,02	4,27	942,4	36,7	103,5	10,77	824,8	32,5	61,29	6,14	1592,8	49,6							
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	blanszowanie (BL) blanching	137,3	14,30	529,0	32,8	52,15	3,47	747,9	49,1	106,3	6,14	650,9	29,6	37,44	3,49	1107,1	29,8							
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	20,61	1,22	929,3	41,4	16,69	0,57	1293,8	27,4	12,18	1,49	1387,1	72,4	12,65	1,85	1624,4	72,8							

Wartości pracy ściskania i pracy przecinania pietruszki ponownie uwodnionej
Compression work and cutting work values for rehydrated parsley

		PIETRUSZKA – MATERIAL UWODNIONY – PARSLEY – REHYDRATED MATERIAL																							
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage						6 miesięcy przechowywania 6 months of storage						12 miesięcy przechowywania 12 months of storage						18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
		P _c mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD				
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	10,56	0,66	318,1	25,0	9,25	0,60	275,7	31,3	9,13	0,51	311,6	19,1	13,74	1,01	190,4	20,1								
	blanszowanie (BL) blanching	5,24	0,55	421,2	22,5	5,96	0,29	585,0	18,8	4,47	0,34	329,2	21,1	5,64	0,40	396,3	23,7								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	8,96	0,47	317,5	29,0	11,11	0,32	356,4	32,9	10,29	0,97	308,9	25,8	7,27	0,67	381,1	22,8								
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	18,07	1,21	196,3	16,1	15,60	0,93	210,1	15,8	12,29	1,14	200,7	8,6	11,44	0,78	240,8	23,8								
	blanszowanie (BL) blanching	14,31	0,49	244,9	23,8	9,44	0,85	305,9	25,3	7,21	0,25	265,9	21,0	9,70	0,66	453,5	17,4								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	11,79	0,43	294,5	13,6	12,52	0,54	297,4	17,1	12,33	0,76	326,1	25,7	12,26	0,98	368,9	22,2								
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	5,16	0,11	278,6	19,6	5,37	0,25	288,4	25,2	5,04	0,47	276,9	20,3	4,87	0,44	369,6	27,7								
	blanszowanie (BL) blanching	7,78	0,71	233,5	17,6	6,25	0,61	203,6	12,6	3,68	0,29	372,4	24,8	4,04	0,26	278,5	17,6								
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	4,18	0,14	201,1	17,9	4,99	0,28	282,8	19,8	4,64	0,73	289,4	20,1	4,80	0,31	269,8	22,1								
Szurowiec – Raw material		P _c = 292,8 SD = 16,44;						P _p = 386,5 SD = 16,6																	

Tabela Z5 Table Z5

Wartości pracy ścisłania i pracy przycinania suszu z selera
Compression work and cutting work values for dried celery

		SELER – SUSZ – CELERY – DRIED MATERIAL																							
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage						6 miesięcy przechowywania 6 months of storage						12 miesięcy przechowywania 12 months of storage						18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
		P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD	P _c mJ·g ⁻¹	SD	Pp mJ·cm ⁻²	SD				
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	17,24	0,96	340,1	14,1	12,08	0,55	645,1	24,8	11,06	0,27	599,0	15,5	10,48	0,56	672,0	24,0	10,48	0,56	672,0	24,0				
	blanszowanie (BL) blanching	15,46	0,91	1102,8	43,2	8,88	0,35	892,2	33,9	10,12	0,43	1602,9	42,8	8,08	0,28	1296,5	22,2	8,08	0,28	1296,5	22,2				
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	3,54	0,26	868,4	19,4	2,27	0,22	913,5	19,7	1,95	0,22	1099,3	29,3	1,75	0,12	1243,4	34,6	1,75	0,12	1243,4	34,6				
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	180,5	7,58	99,2	4,0	119,64	6,91	166,4	6,7	100,24	3,23	128,5	7,1	105,54	4,55	198,5	7,1	105,54	4,55	198,5	7,1				
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	blanszowanie (BL) blanching	202,8	12,81	71,2	2,2	100,28	5,65	161,6	7,8	99,48	5,66	168,1	6,5	92,92	3,22	139,8	5,6	92,92	3,22	139,8	5,6				
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	28,66	1,33	326,6	27,3	19,94	0,97	388,1	12,2	16,42	1,08	331,0	10,6	17,38	0,82	366,6	10,6	17,38	0,82	366,6	10,6				
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	97,00	5,20	116,6	5,6	77,12	3,48	206,8	8,3	53,46	2,14	257,5	9,7	50,84	1,81	201,8	9,7	50,84	1,81	201,8	9,7				
	blanszowanie (BL) blanching	103,2	6,14	46,4	2,8	83,16	2,64	123,4	7,3	62,44	2,12	93,2	4,0	56,70	2,34	123,3	5,1	56,70	2,34	123,3	5,1				
Suszenie mikrofalowo-podciśnieniowe (SMP) vacuum-microwave drying	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	54,31	3,30	122,3	7,3	29,54	1,38	205,4	7,9	21,66	1,67	247,9	8,8	20,60	0,74	291,8	7,6	20,60	0,74	291,8	7,6				
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	97,00	5,20	116,6	5,6	77,12	3,48	206,8	8,3	53,46	2,14	257,5	9,7	50,84	1,81	201,8	9,7	50,84	1,81	201,8	9,7				

Wartości pracy ściskania i pracy przecinania selera ponownie uwodnionego
Compression work and cutting work values for rehydrated celery

		SELER – MATERIAŁ UWODNIONY – CELERY – REHYDRATED MATERIAL																	
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
		P _C mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	P _C mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	P _C mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	P _C mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²	P _C mJ	SD	Pp mJ·cm ⁻²			
Suszenie konwekcyjne (SK)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	1,77	0,10	163,6	9,9	0,07	146,8	5,5	0,05	172,8	4,9	0,03	184,4	5,6					
	blanszowanie (BL) blanching	2,48	0,07	175,1	7,5	0,05	155,3	5,6	0,07	178,6	3,7	0,07	184,8	5,1					
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	2,83	0,14	229,8	12,7	0,04	169,2	5,5	0,07	202,2	7,1	0,04	235,2	7,0					
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	9,93	0,60	119,5	8,6	0,35	98,4	3,8	0,12	117,7	5,1	0,33	120,1	7,7					
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	blanszowanie (BL) blanching	11,26	0,28	106,1	4,6	0,17	125,0	5,2	0,16	133,9	6,2	0,34	114,9	7,0					
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	9,16	0,29	168,3	4,9	0,25	217,3	9,5	0,32	242,4	5,6	0,21	139,4	5,0					
Suszenie mikrofalowe -podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	2,40	0,08	227,0	19,7	0,12	255,2	6,2	0,07	228,4	6,1	0,11	270,5	9,7					
	blanszowanie (BL) blanching	2,29	0,17	196,0	7,3	0,09	234,5	4,9	0,09	190,5	6,6	0,06	220,4	4,5					
Suszenie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	2,66	0,09	101,9	2,8	0,06	104,5	5,5	0,08	91,6	4,3	0,06	107,6	5,1					
Surowiec – Raw material		P _C = 124,94 SD = 4,77; Pp = 111,6 SD = 5,2																	

Tabela Z7 Table Z7

Wartości parametrów a i b opisujące zmiany w czasie współczynnika normalizującego krzywe relaksacji naprężeń suszu z marchwi
 The values of a and b parameters that describe relaxation curves standardization factor changes for dried carrot

		$Y(\tau) = (a \cdot b \cdot \tau) \cdot (1 + b \cdot \tau)^{-1}$												
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage			
		a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	SE
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,68	0,040	0,797	0,70	0,036	0,888	0,68	0,040	0,906	0,67	0,041	0,902	0,057
	blanszowanie (BL) blanching	0,80	0,067	0,926	0,80	0,041	0,881	0,78	0,045	0,908	0,80	0,041	0,889	0,067
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,82	0,052	0,817	0,72	0,043	0,861	0,69	0,053	0,865	0,70	0,061	0,911	0,050
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,80	0,63	0,906	0,82	0,065	0,905	0,80	0,063	0,928	0,82	0,072	0,927	0,054
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	blanszowanie (BL) blanching	0,81	0,070	0,908	0,82	0,085	0,935	0,82	0,065	0,911	0,81	0,087	0,925	0,064
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,83	0,063	0,901	0,80	0,091	0,935	0,77	0,064	0,924	0,75	0,076	0,924	0,056
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,81	0,053	0,907	0,80	0,061	0,942	0,79	0,062	0,917	0,81	0,053	0,924	0,051
	blanszowanie (BL) blanching	0,80	0,079	0,853	0,81	0,082	0,918	0,81	0,083	0,911	0,82	0,056	0,925	0,055
Suszenie mikrotalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,87	0,64	0,888	0,84	0,066	0,911	0,83	0,057	0,912	0,79	0,056	0,928	0,045

Tabela Z9 Table Z9

Wartości parametrów a i b opisujące zmiany w czasie współczynnika normalizującego krzywe relaksacji naprężeń suszu z selera
 The values of a and b parameters that describe relaxation curves standardization factor changes for dried celery

		$Y(\tau) = (a \cdot b \cdot \tau) \cdot (1 + b \cdot \tau)^{-1}$												
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage			
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	SE
		Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,56	0,038	0,891	0,044	0,58	0,044	0,912	0,032	0,55	0,052	0,914
0,70	0,028			0,914	0,051	0,72	0,031	0,932	0,037	0,68	0,030	0,924	0,029	0,036
0,70	0,039			0,862	0,040	0,69	0,040	0,889	0,052	0,69	0,042	0,911	0,052	0,061
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,62	0,044	0,899	0,059	0,61	0,39	0,911	0,041	0,62	0,042	0,895	0,039	0,039
		0,62	0,040	0,880	0,065	0,62	0,042	0,931	0,051	0,60	0,039	0,875	0,037	0,048
		0,78	0,064	0,925	0,058	0,75	0,058	0,921	0,047	0,74	0,052	0,931	0,058	0,053
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,63	0,041	0,882	0,059	0,63	0,038	0,913	0,039	0,61	0,041	0,879	0,048	0,057
		0,65	0,036	0,902	0,057	0,64	0,032	0,933	0,044	0,62	0,034	0,921	0,037	0,061
		0,88	0,037	0,855	0,045	0,85	0,034	0,929	0,028	0,81	0,037	0,916	0,051	0,041

Wartości parametrów a i b opisujące zmiany w czasie współczynnika normalizującego krzywe relaksacji naprężeń dla uwodnionej marchwi
 The values of a and b parameters that describe relaxation curves standardization factor changes for rehydrated carrot

		$Y(\tau) = (a \cdot b \cdot \tau) \cdot (1 + b \cdot \tau)^{-1}$														
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	SE		
		Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,87	0,080	0,847	0,85	0,031	0,932	0,040	0,79	0,024	0,869	0,054	0,75	0,020
odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,75		0,037	0,929	0,67	0,016	0,959	0,029	0,70	0,014	0,935	0,037	0,68	0,021	0,927	0,040
brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,70		0,042	0,917	0,65	0,018	0,889	0,047	0,67	0,018	0,941	0,034	0,72	0,029	0,935	0,035
Suszenie mikrofalowo- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,66	0,039	0,836	0,60	0,053	0,934	0,039	0,63	0,071	0,943	0,034	0,60	0,069	0,943	0,043
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,65	0,029	0,869	0,62	0,013	0,832	0,061	0,62	0,026	0,898	0,045	0,52	0,030	0,887	0,042
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,62	0,057	0,836	0,57	0,021	0,919	0,036	0,62	0,021	0,914	0,044	0,58	0,013	0,870	0,047
Suszenie mroźne (SM) Freezing-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,65	0,035	0,942	0,67	0,020	0,916	0,043	0,67	0,017	0,934	0,036	0,68	0,021	0,914	0,044
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,67	0,021	0,905	0,65	0,017	0,924	0,039	0,68	0,018	0,843	0,061	0,68	0,023	0,881	0,051
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment blanszowanie (BL) blanching	0,62	0,031	0,932	0,64	0,024	0,898	0,061	0,61	0,029	0,939	0,033	0,61	0,044	0,918	0,039
Surowiec – Raw material		$a = 0,39$			$b = 0,020$			$R^2 = 0,887$			$SE = 0,028$					

Tabela Z11 Table Z11
 Wartości parametrów a i b opisujące zmiany w czasie współczynnika normalizującego krzywe relaksacji naprężeń dla uwodnionej pietruszki
 The values of a and b parameters that describe relaxation curves standardization factor changes for rehydrated parsley

		$Y(\tau) = (a \cdot b \cdot \tau) \cdot (1 + b \cdot \tau)^{-1}$															
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage						
		a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²				
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,79	0,041	0,787	0,090	0,75	0,032	0,949	0,042	0,69	0,029	0,936	0,041	0,69	0,028	0,939	0,038
	blanszowanie (BL) blanching	0,78	0,014	0,940	0,049	0,75	0,022	0,950	0,040	0,68	0,026	0,868	0,051	0,70	0,021	0,862	0,058
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,72	0,031	0,917	0,056	0,70	0,038	0,937	0,042	0,71	0,027	0,939	0,041	0,70	0,040	0,965	0,034
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,78	0,073	0,830	0,092	0,63	0,034	0,925	0,044	0,58	0,027	0,926	0,035	0,60	0,043	0,926	0,039
	blanszowanie (BL) blanching	0,68	0,032	0,933	0,048	0,58	0,046	0,928	0,035	0,54	0,035	0,939	0,028	0,58	0,026	0,939	0,032
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,60	0,048	0,912	0,050	0,60	0,056	0,948	0,033	0,62	0,054	0,938	0,037	0,58	0,038	0,937	0,034
Suszenie mikrofalowo-podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,67	0,032	0,892	0,052	0,72	0,021	0,902	0,054	0,68	0,028	0,889	0,054	0,70	0,020	0,916	0,047
	blanszowanie (BL) blanching	0,68	0,028	0,953	0,038	0,60	0,024	0,863	0,055	0,62	0,025	0,909	0,044	0,64	0,025	0,956	0,030
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,65	0,047	0,822	0,061	0,62	0,040	0,877	0,057	0,64	0,039	0,930	0,040	0,63	0,038	0,939	0,034
Surowiec – Raw material		a = 0,35			b = 0,031			R ² = 0,920			SE = 0,020						

Tabela Z12 Table Z12

Wartości parametrów a i b opisujące zmiany w czasie współczynnika normalizującego krzywe relaksacji naprężeń dla uwodnionego selera
 The values of a and b parameters that describe relaxation curves standardization factor changes for rehydrated celery

		$Y(t) = (a \cdot b \cdot \tau) \cdot (1 + b \cdot \tau)^{-1}$														
		0 miesięcy przechowywania 0 months of storage			6 miesięcy przechowywania 6 months of storage			12 miesięcy przechowywania 12 months of storage			18 miesięcy przechowywania 18 months of storage					
		a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	SE		
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,78	0,041	0,858	0,74	0,053	0,916	0,056	0,75	0,042	0,915	0,056	0,71	0,048	0,931	0,044
	blanszowanie (BL) blanching	0,75	0,034	0,879	0,75	0,036	0,898	0,035	0,72	0,036	0,911	0,031	0,71	0,037	0,909	0,063
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,71	0,031	0,886	0,72	0,042	0,914	0,039	0,69	0,051	0,926	0,039	0,65	0,041	0,911	0,053
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,72	0,044	0,926	0,72	0,049	0,936	0,031	0,69	0,049	0,898	0,042	0,69	0,053	0,912	0,039
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	blanszowanie (BL) blanching	0,68	0,032	0,954	0,69	0,034	0,931	0,039	0,66	0,040	0,892	0,049	0,64	0,042	0,899	0,048
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,66	0,041	0,943	0,63	0,047	0,911	0,024	0,62	0,047	0,905	0,063	0,62	0,044	0,876	0,038
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	0,69	0,048	0,898	0,68	0,044	0,898	0,049	0,66	0,053	0,931	0,022	0,63	0,039	0,934	0,061
	blanszowanie (BL) blanching	0,66	0,042	0,869	0,66	0,039	0,908	0,051	0,63	0,047	0,924	0,032	0,61	0,038	0,921	0,029
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	0,62	0,045	0,877	0,61	0,41	0,910	0,042	0,59	0,048	0,935	0,029	0,58	0,045	0,919	0,037
Surowiec – Raw material		$a = 0,40$			$b = 0,051$			$R^2 = 0,915$			$SE = 0,032$					

Tabela Z13 Table Z13

Względne przyrosty masy próbki, przyrosty masy wody i zawartość suchej substancji w trakcie rehydracji marchwi
Relative gain of sample mass, relative gain of water mass and relative loss of dry matter mass during carrot rehydration

	Przyrost masy próbki Gain of sample mass			Przyrost masy wody Gain of water mass			Ubytek masy suchej substancji Loss of dry matter mass											
	bepośrednio po suszeniu just after drying	po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage		bepośrednio po suszeniu just after drying	po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage		bepośrednio po suszeniu just after drying	po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage										
		I	II		III	I		II	III	I	II	III						
		Suszenie konwekcyjne (SK)	5,51		0,19	0,982		5,49	0,21	0,979	0,89	0,03	0,985	0,87	0,03	0,987	0,31	0,02
brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	7,90	0,28	0,979	7,87	0,25	0,982	0,95	0,04	0,980	0,94	0,03	0,983	0,38	0,02	0,989	0,38	0,03	0,982
Suszenie sublimacyjne (SS)	5,30	0,20	0,977	5,18	0,32	0,936	0,82	0,03	0,980	0,79	0,06	0,980	0,27	0,02	0,990	0,32	0,02	0,995
odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	5,12	0,12	0,994	5,08	0,11	0,995	0,72	0,02	0,995	0,69	0,03	0,991	0,33	0,02	0,989	0,19	0,03	0,985
brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	6,58	0,16	0,994	6,50	0,19	0,992	0,69	0,02	0,995	0,68	0,02	0,992	0,37	0,02	0,984	0,38	0,03	0,981
Suszenie mikrofalowo- podciśnieniowe (SMP)	4,45	0,10	0,993	4,44	0,12	0,991	0,66	0,02	0,993	0,66	0,03	0,989	0,29	0,02	0,989	0,30	0,03	0,984
odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration	6,19	0,30	0,964	6,15	0,22	0,975	0,84	0,05	0,967	0,82	0,04	0,975	0,29	0,04	0,971	0,23	0,02	0,994
brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment	8,68	0,25	0,987	8,60	0,19	0,991	0,86	0,03	0,986	0,82	0,03	0,989	0,37	0,03	0,983	0,36	0,03	0,977
blanszowanie (BL) blanching	5,17	0,08	0,996	5,16	0,13	0,992	0,82	0,01	0,996	0,81	0,02	0,995	0,31	0,02	0,989	0,24	0,02	0,993
odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration																		

I – wartość równowagowa – equilibrium value, II – błąd standardowy estymacji – standard error, III – współczynnik determinacji r^2 – coefficient of determination r^2

Względne przyrosty masy próbki, przyrosty masy wody i zawartość suchej substancji w trakcie rehydracji pietruszki
Relative gain of sample mass, relative loss of dry matter mass and relative loss of dry matter mass during parsley rehydration

	Przyrost masy próbki Gain of sample mass						Przyrost masy wody Gain of water mass						Ubytek masy suchej substancji Loss of dry matter mass					
	bepośrednio po suszeniu just after drying			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			bepośrednio po suszeniu just after drying			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			bepośrednio po suszeniu just after drying			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Suszenie konwekcyjne (SK) Convective drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	
	5,84	0,21	0,979	5,70	0,25	0,972	0,98	0,04	0,982	0,89	0,04	0,974	0,45	0,019	0,988	0,36	0,02	0,984
	6,27	0,29	0,966	4,88	0,12	0,990	0,96	0,05	0,969	0,95	0,03	0,992	0,51	0,025	0,975	0,45	0,02	0,990
Suszenie sublimacyjne (SS) Freeze-drying	odwadnianie osmotyczne osmotic dehydration																	
	5,29	0,14	0,989	4,65	0,08	0,996	0,96	0,02	0,996	0,92	0,01	0,997	0,35	0,019	0,992	0,33	0,02	0,991
	5,59	0,11	0,995	4,68	0,10	0,994	0,78	0,02	0,995	0,85	0,02	0,995	0,55	0,019	0,981	0,39	0,02	0,990
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	odwadnianie osmotyczne osmotic dehydration																	
	7,39	0,21	0,992	5,30	0,14	0,991	0,92	0,01	0,998	0,76	0,02	0,993	0,52	0,014	0,988	0,49	0,02	0,988
	4,67	0,23	0,964	4,51	0,12	0,990	0,78	0,05	0,969	0,67	0,02	0,988	0,43	0,020	0,987	0,34	0,03	0,975
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	
	5,76	0,12	0,991	5,31	0,06	0,997	0,89	0,02	0,993	0,99	0,01	0,997	0,34	0,025	0,981	0,40	0,02	0,991
	7,55	0,29	0,964	5,85	0,12	0,993	0,81	0,03	0,969	0,92	0,02	0,993	0,47	0,021	0,981	0,41	0,02	0,985
Suszenie mikrofalowe- podciśnieniowe (SMP) Vacuum-microwave drying	odwadnianie osmotyczne osmotic dehydration																	
	5,62	0,21	0,974	4,84	0,14	0,983	0,62	0,03	0,977	0,98	0,03	0,994	0,40	0,023	0,985	0,28	0,02	0,992

I – wartość równowagowa – equilibrium value, II – błąd standardowy estymacji – standard error, III – współczynnik determinacji r^2 – coefficient of determination r^2

Tabela Z15 Table Z15

Względne przyrosty masy próbki, przyrosty masy wody i zawartość suchej substancji w trakcie rehydracji selera
Relative gain of sample mass, relative gain of water mass and relative loss of dry matter mass during celery rehydration

	Przyrost masy próbki						Przyrost masy wody						Ubytek masy suchej substancji					
	Gain of sample mass			Gain of water mass			Loss of dry matter mass			Gain of sample mass			Gain of water mass			Loss of dry matter mass		
	po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage			po 18 miesiącach przechowywania after 18 months of storage		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Suszenie konwekcyjne (SK)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	
	7,05	0,23	0,987	6,98	0,19	0,989	0,68	0,02	0,989	0,66	0,02	0,990	0,45	0,01	0,994	0,39	0,01	0,993
	blanszowanie (BL) blanching																	
	8,83	0,34	0,980	8,24	0,22	0,985	0,78	0,03	0,981	0,75	0,02	0,991	0,49	0,02	0,992	0,44	0,01	0,995
Suszenie mikrofalowe (SMP)	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration																	
	6,83	0,43	0,947	6,32	0,32	0,962	0,89	0,06	0,956	0,82	0,05	0,965	0,35	0,01	0,996	0,27	0,03	0,987
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	
	7,26	0,42	0,963	6,99	0,38	0,967	0,65	0,04	0,966	0,60	0,03	0,971	0,51	0,02	0,978	0,48	0,02	0,979
Suszenie sublimacyjne (SS)	blanszowanie (BL) blanching																	
	8,55	0,71	0,938	8,12	0,42	0,958	0,73	0,07	0,941	0,69	0,05	0,959	0,58	0,02	0,973	0,55	0,2	0,977
	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration																	
	5,16	0,20	0,981	4,85	0,25	0,978	0,63	0,03	0,983	0,55	0,04	0,981	0,41	0,02	0,985	0,32	0,03	0,982
Suszenie mikrofalowe (SMP)	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	
	8,39	0,26	0,988	7,76	0,28	0,987	0,78	0,02	0,990	0,75	0,04	0,986	0,39	0,02	0,988	0,35	0,02	0,991
	blanszowanie (BL) blanching																	
	10,07	0,30	0,988	9,22	0,42	0,982	0,85	0,03	0,988	0,82	0,03	0,988	0,49	0,02	0,985	0,44	0,02	0,988
Suszenie podciśnieniowe (SMP)	odwadnianie osmotyczne (OS) osmotic dehydration																	
	6,85	0,30	0,967	6,12	0,26	0,972	0,73	0,04	0,969	0,71	0,03	0,973	0,37	0,01	0,995	0,31	0,02	0,993
	brak obróbki wstępnej (BO) without pretreatment																	

I – wartość równowagowa – equilibrium value, II – błąd standardowy estymacji – standard error, III – współczynnik determinacji r^2 – coefficient of determination r^2