

## WPŁYW TEMPERATURY SUSZENIA I ZAWARTOŚCI WODY NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MODELOWEGO ŻELU AGAROWEGO

*Ewa Jakubczyk, Marek Pokrzywnicki*

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa  
e-mail: jakubczyk@alpha.sggw.waw.pl

**Streszczenie.** Celem pracy było określenie wpływu temperatury suszenia konwekcyjnego w zakresie od 30 do 80°C oraz końcowej zawartości wody w materiale na właściwości mechaniczne modelowego żelu agarowego. Żele suszono do równowagowej zawartości wody i do 20% wilgotności końcowej, badając skurcz i określając właściwości mechaniczne na podstawie testu ściskania. Przy częściowym usunięciu wody z żelu, istotną rolę w kształtowaniu cech mechanicznych odgrywać może w większym stopniu wilgotność suszu niż zastosowana temperatura suszenia. Przy suszeniu do równowagowej zawartości wody największe obniżenie odporności materiału na ściskanie obserwowano dla materiału suszonego w temperaturze 50°C. Podwyższenie temperatury do 70 i 80°C wpływało na wzrost wytrzymałości materiału. Spowolniony proces usuwania wody w temperaturze 30°C wpływał na zapadanie struktur wewnętrznych, usztywnienie powierzchni i utwardzenie struktury żelu.

**Słowa kluczowe:** suszenie konwekcyjne, żel agarowy, skurcz, właściwości mechaniczne

### WSTĘP

Produkty spożywcze są wieloskładnikowymi systemami, które składają się z biomolekuł takich jak białka, cukry i lipidy. Charakterystyka chemicznych i fizycznych zmian zachodzących w materiale podczas procesu technologicznego jest utrudniona ze względu na złożoną strukturę żywności. Istnieje, zatem konieczność wprowadzenia uproszczonego modelu opisującego produkt spożywczy, aby umożliwić analizę czynników wpływających na jakość produktów [5].

Do sporządzania modelowych żeli stosuje się najczęściej agar, skrobię i krystaliczną celulozę. Schrader i Litchfield [15] stwierdzili, że system składający się z agaru i mikrokrystalicznej celulozy był dobrym materiałem jako model produktu spożywczego. Profile suszenia modelowych żeli agarowych żywności były zbliżone kształtem do uzyskanych dla jabłek. Jednocześnie badania potwierdziły

występowanie sztywnej warstwy zewnętrznej w strukturze suszonych żeli, charakterystycznej również dla materiałów biologicznych. Podczas suszenia żeli wytwarzają się często struktury porowate, których ścianki zbudowane są ze składników suchej masy żelu. Suszenie żeli umożliwia stworzenie modelowych systemów do badań, których celem jest odkrycie zależności między składem ścian komórkowych a teksturą porowatych ciał stałych [2,12].

Jedną z najważniejszych fizycznych zmian zachodzących podczas suszenia żywności jest zmniejszenie jej objętości. Utrata wody i ogrzewanie wpływają na zmianę kształtu i zmniejszenie wymiarów materiałów biologicznych, co prowadzi do powstania naprężeń w strukturze komórkowej [9]. W wyniku usunięcia wody następuje zniszczenie naturalnej struktury, utrata półprzepuszczalności błon, w związku z tym ulegają również zmianie właściwości reologiczne tkanki roślinnej [4]. Jakubczyk i in. [3] badali właściwości mechaniczne modelu żelowego symulującego składem jabłko. Proces suszenia wpływał na znaczny skurcz i większe usztywnienie materiału żelowego w porównaniu z tkanką jabłka. Obniżenie zawartości wody w żelu agarowym podczas suszenia było przyczyną wzrostu kruchości, a nawet prowadziło do pęknięcia układu [8].

Metoda suszenia i parametry suszenia wpływają na rodzaj zmian fizykochemicznych w materiale i jakość odwodnionego produktu. Wpływ temperatury suszenia na skurcz materiałów i właściwości mechaniczne nie jest jednoznaczny. Del Valle i in. [1] oraz McMinn i Magee [11] obserwowali ograniczenie skurczu materiału biologicznego przy wzroście temperatury suszenia, natomiast dla suszenia ziemniaków i jabłek wpływ temperatury był trudny do zdefiniowania [14]. Decydującą rolę może odgrywać temperatura suszenia, gdyż wpływa na szybkość procesu, a produkt suszony z dużą szybkością charakteryzuje się często mniejszym skurczem [18]. Szybsze suszenie redukuje zawartość wody szczególnie na powierzchni, a porowata i sucha skorupka staje się bardziej sprężysta [6]. Simal i in. [16] prowadząc badania suszenia konwekcyjnego jabłek, stwierdzili, że szybkość suszenia wzrastała wraz ze wzrostem temperatury suszenia pomiędzy 30 a 60°C, jednocześnie temperatury wyższe od 60°C wpływały na utwardzenie materiału.

Celem pracy było określenie wpływu temperatury suszenia konwekcyjnego oraz końcowej zawartości wody w materiale na właściwości mechaniczne modelowego żelu agarowego.

#### MATERIAŁ I METODY

Materiałem do badań był modelowy żel agarowy o następującym składzie: 96% wody destylowanej, 2% agaru (Frimulsion AG firmy Cesalpinia Food Spa), 2% preparatu błonnika jabłkowego AF400/30 (Vitacel, firmy Rettenmaier). Według danych producenta błonnik jabłkowy zawierał m.in. 45% błonnika nierozpuszczal-

nego, 15% błonnika rozpuszczalnego, 9,3% pektyn, 8% wody oraz proteiny, tłuszcze, kwas jabłkowy i substancje mineralne.

Metodyka przygotowania modelowego żelu opracowana została w oparciu o normy sporządzania żelu agarowego, a także w oparciu o własne doświadczenia. Przygotowanie modelowego żelu polegało na wymieszaniu proszków agaru i błonnika jabłkowego na sucho, a następnie wsypaniu uzyskanej mieszaniny do naczynia z wodą destylowaną i ogrzaniu w łaźni do temperatury 90°C. Roztwór wylewano na szalkę Petriego, studzono i przechowywano w temperaturze 4°C przez 24 h. Przed procesem suszenia żel pokrojono w kostki o boku 10 mm.

Proces suszenia przeprowadzono w suszarce konwekcyjnej z wymuszonym obiegiem powietrza, które to powietrze poruszało się równoległe do ułożonego na sicie materiału, ze średnią prędkością 1,5 m·s<sup>-1</sup>. Obciążenie sita suszarki wyniosło 1,6 kg·m<sup>-2</sup>. Suszenie odbywało się w temperaturach: 30, 50, 70 i 80°C i przebiegało do równowagowej zawartości wody oraz do około 20% zawartości wody w materiale. Na podstawie kinetyki szybkości suszenia wyznaczono czas procesu niezbędny do uzyskania wymaganej 20% zawartości wody. Materiał po procesie suszenia przechowywano przez okres 48 godzin, następnie poddano dalszym oznaczeniom.

Zawartość wody w materiale oznaczono metodą suszenia zgodnie z normą (PN-A-79011-3/98). Aktywność wody określono dla żeli przed i po procesie suszenia z dokładnością do ±0,001 za pomocą aparatu Hygroskop DT2 (Rotronic). Objętość próbek przed i po suszeniu oznaczano metodą toluenową zgodnie z metodyką podaną przez Mazza [10].

Właściwości mechaniczne modelowego żelu przed i po procesie suszenia zbadano za pomocą teksturometru TA-XT2i (Stable Micro Systems). Test ściskania przeprowadzono stosując tłok o średnicy 20 mm. Próbkę ściskano ze stałą prędkością 0,2 mm·s<sup>-1</sup> do odkształcenia 20% wysokości początkowej materiału. Testy ściskania przeprowadzono w 10 powtórzeniach. W czasie testu ściskania rejestrowano zmiany siły w niutonach z dokładnością ±0,01N.

Skurcz materiału  $S_v$  obliczono według wzoru:

$$S_v = 1 - \frac{V_t}{V_0} \quad (1)$$

gdzie:  $V_t$  – średnia objętość próbek żelu po suszeniu (mm<sup>3</sup>),  $V_0$  – średnia objętość próbek żelu przed suszeniem (mm<sup>3</sup>).

Odkształcenie próbki  $\varepsilon_o$  obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon_o = \frac{l_o - l}{l_o} \quad (2)$$

gdzie:  $l_o$  – wymiar próbki przed ściśnięciem (mm),  $l$  – wymiar po ściśnięciu (mm).

Naprężenie  $\sigma$  wyznaczono jako:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

gdzie:  $F$  – siła (N),  $S$  – pole przekroju poprzecznego próbek przed odkształceniem ( $m^2$ ).

Pracę ściskania (mJ) wyznaczono jako pole pod krzywą w układzie: siła (N) – przemieszenie (mm), przy wykorzystaniu programu komputerowego Texture Expert.

Wyniki poddano obróbce statystycznej z wykorzystaniem pakietu Statgraphics Plus v. 3.0 przeprowadzając analizę wariancji, z porównaniem średnich testem Tukeya przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

## WYNIKI I DYSKUSJA

### **Żele suszone do 20% zawartości wody**

Proces usuwania wody z materiału wpływał na szereg zmian zachodzących w strukturze żelu i oddziaływał na właściwości badanego materiału. Modelowy żel agarowy o zawartości 95,81% wody (tab. 1), poddano suszeniu konwekcyjnemu, które prowadzono do obniżenia zawartości wody do 20%. W zależności od zastosowanej temperatury czas suszenia wahał się od 62 min w temp. 80°C do 146 min w 30°C (tab. 2). Zawartość wody w żelach suszonych w badanym zakresie temperatur była zbliżona, aczkolwiek żele suszone w temperaturze 50 i 80°C charakteryzowały się wyższą nawet o 20% zawartością wody od materiału suszonego w temperaturze 30 i 70°C. Aktywność wody suszonych żeli nie różniła się statystycznie istotnie.

Temperatura suszenia miała istotny wpływ na skurcz objętościowy żelu. Przy suszeniu do 20% zawartości wody obserwowano mniejszy skurcz materiału suszonego w temperaturze 30 i 80°C. Mimo, iż skurcz żeli suszonych w 50 i 70°C wynosił średnio 0,94 i był tylko o kilka procent większy niż żeli suszonych w innych temperaturach, różnice te były statystycznie istotne. Wysoka temperatura 80°C ograniczyła zapadanie struktury tkankowej i skurcz materiału.

Proces suszenia, w którym następuje tylko częściowe odparowanie wody prowadzony do poziomu wilgotności 15-35% jest często stosowany jako etap przed suszeniem eksplozyjnym. Te zawartości wody są charakterystyczne dla początkowego etapu zmniejszającej się szybkości suszenia [17]. Zatem obniżenie poziomu zawartości wody do około 20% daje materiał o średniej zawartości wody, wysokiej aktywności wody, ale o strukturze nieusztynionej, co ma istotny wpływ na zachowanie materiałów podczas testów ściskania.

**Tabela 1.** Charakterystyka żelu agarowego, przed suszeniem**Table 1.** Characteristics of agar gel, before drying

Zawartość wody w suszonym żelu Moisture content in dried gel (%)	Aktywność wody w suszonym żelu Water activity in dried gel	Praca ściskania Compression work (mJ)	Naprężenie przy $\varepsilon_0 = 0,2$ Stress at $\varepsilon_0 = 0.2$ (kPa)
95,81 ± 0,15	0,947 ± 0,082	4,1 ± 0,4	463,0 ± 55,4

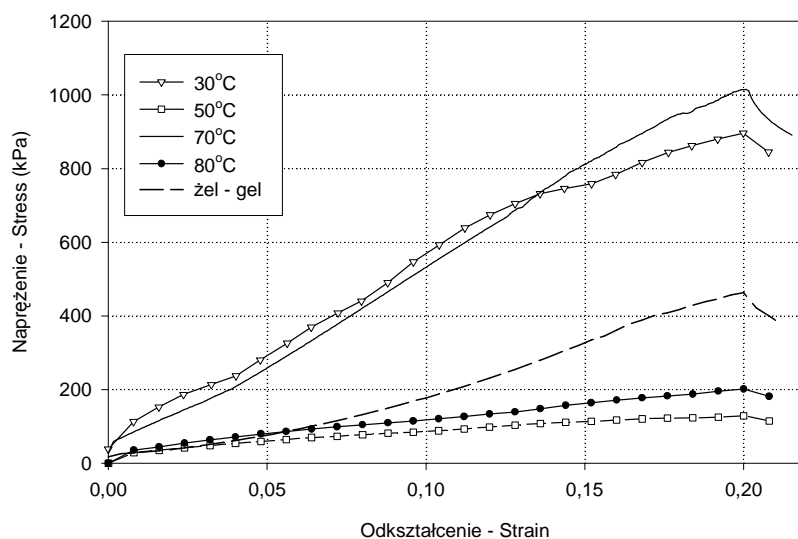
**Tabela 2.** Właściwości żelu suszonego w temperaturach 30-80°C do zawartości wody około 20%**Table 2.** Properties of gel dried to 20% of water content at temperatures of 30-80°C

Temperatura suszenia Drying temperature (°C)	Zawartość wody w suszonym żelu Moisture content in dried gel (%)	Aktywność wody w suszonym żelu Water activity in dried gel	Czas suszenia Drying time (min)	Skurcz $S_v$ Shrinkage $S_v$
30	21,17 ± 0,88	0,904 ± 0,024	146	0,920 ± 0,017
50	25,80 ± 1,22	0,930 ± 0,072	95	0,940 ± 0,042
70	21,54 ± 0,45	0,917 ± 0,041	62	0,940 ± 0,024
80	26,18 ± 1,58	0,913 ± 0,091	62	0,915 ± 0,015

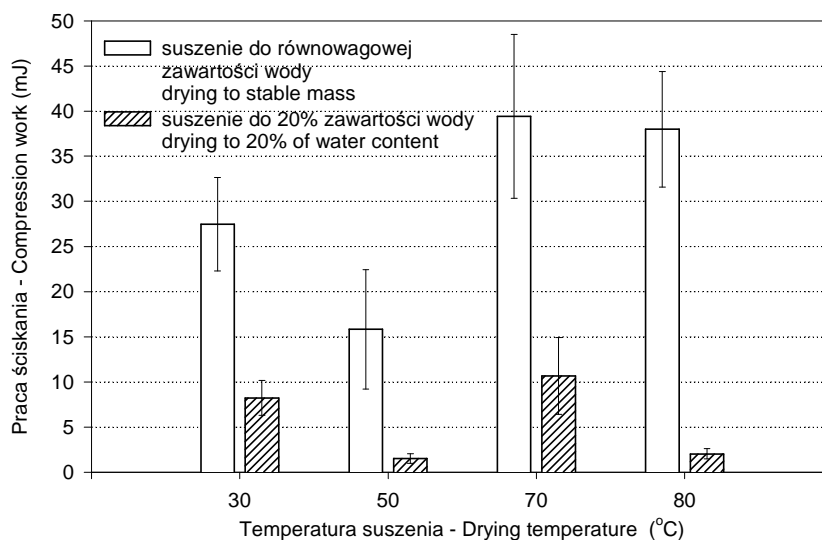
Na rysunku 1 przedstawiono średnie krzywe ściskania żelu przed suszeniem oraz żeli suszonych do 20% zawartości wody w temperaturze 30, 50, 70 i 80°C. Żel agarowy (przed suszeniem) charakteryzuje się wyższymi wartościami naprężeń uzyskanymi podczas testu ściskania od materiału suszonego w temperaturze 50 i 80°C. Żele suszone w 50 i 80°C są materiałami o obniżonej odporności na ściskanie, dla których wartość naprężenia uzyskanego przy odkształceniu rzeczywistym 0,2 była ponad dwukrotnie mniejsza od wartości uzyskanej dla żelu przed suszeniem. Częściowe usunięcie wody sprawia, że materiał suszony w 50 i 80°C staje się bardziej podatny na odkształcenie niż żel agarowy. Usztywnienie materiału i wzrost odporności na ściskanie obserwowano w żelach suszonych w temperaturze 30 i 70°C, dla których wartość końcowego naprężenia wzrastała ponad dwukrotnie w porównaniu do żelu agarowego.

Dla materiału suszonego do zawartości wody 20% praca wykonana w teście ściskania zawierała się w przedziale od 1,51 ± 0,51 mJ dla żelu suszonego w temperaturze 50°C do 10,66 ± 4,25 mJ dla żelu suszonego w temperaturze 70°C (rys. 2). Dla materiału suszonego w temperaturze 80 i 50°C praca ściskania jest niższa 5-7-krotnie w stosunku do wartości uzyskanej dla materiału suszonego w temperaturze 70°C. Praca ściskania jest wskaźnikiem sprężystości materiału, stąd można przypuszczać, że materiał suszony w temperaturze 50 i 80°C jest bardziej miękki

i mniej sprężysty, niż żel agarowy przed suszeniem (tab. 1) i żel suszony w temperaturze 30 i 80°C.



**Rys. 1.** Krzywe ściskania żelu agarowego i żeli suszonych do 20% zawartości wody  
**Fig. 1.** Compression curves of agar gel and gels dried to 20% of water content



**Rys. 2.** Charakterystyka pracy ściskania żeli suszonych w temperaturze od 30 do 80°C  
**Fig. 2.** Characteristics of compression work of dried gels at temperature in the range from 30 to 80°C

Podczas suszenia konwekcyjnego żeli w których następuje częściowe usunięcie wody, istotny jest wpływ pozostałej wody w materiale na właściwości mechaniczne. Żel suszony w temperaturze 30 i 70°C miał zbliżoną końcową zawartość wody i charakteryzował się podobnymi właściwościami mechanicznymi. Materiały, których wilgotność nieznacznie przekraczała 25%, a były to żele suszone w temperaturze 50 i 80°C były miękkie i mniej sprężyste, niż żel agarowy przed suszeniem. Usunięcie kolejnych kilku procent wody z materiału do wilgotności ~21% (żele suszone w 30 i 70°C) wpływało na usztywnienie i wzrost właściwości sprężystych. Lewicki i Jakubczyk [6] stwierdzili, że zawartość wody w materiale suszonym może wpływać na wytrzymałość materiału i jego odporność na deformację. Ubytek wody, powoduje wzrost koncentracji substancji rozpuszczonych, które dodają sztywności ścianom [13].

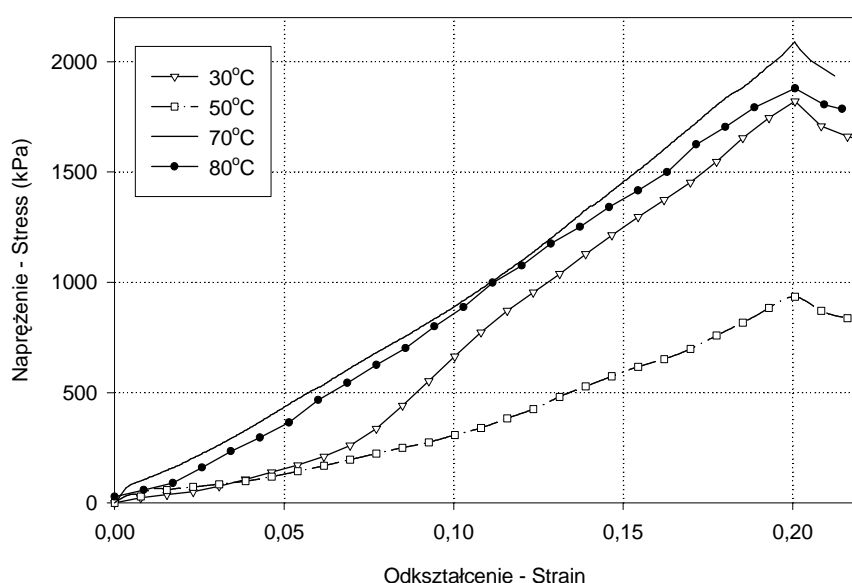
### Żele suszone do równowagowej zawartości wody

Żele suszone w temperaturze 50, 70 i 80°C do równowagowej zawartości wody miały zbliżoną wilgotność ~10% i aktywność wody o średniej wartości 0,515 (tab. 3). Żel suszony w temperaturze 30°C charakteryzował się większą o 25% zawartością i aktywnością wody od pozostałych suszonych żeli. Zastosowanie temperatury 30°C wydłużyło 2,5-krotnie czas suszenia w porównaniu z suszeniem w temperaturze 70 i 80°C. Mimo, tych różnic skurcz objętościowy żeli nie różnił się statystycznie istotnie i wynosił średnio 0,945. W temperaturze 70 i 80°C skurcz jednak był liniowy. W niższych temperaturach suszenia rejestrowano większe zmiany wysokości materiału niż pola przekroju. Wysokość kostki żelu suszonej w temp. 30 była mniejsza o 14%, a w temperaturze 50°C o 10% od wysokości próbki suszonej w 70 i 80°C.

**Tabela 3.** Właściwości żelu suszonego w temperaturach 30-80°C do równowagowej zawartości wody  
**Table 3.** Properties of gel dried to equilibrium water content at temperatures of 30-80°C

Temperatura suszenia Drying temperature (°C)	Zawartość wody w suszonym żelu Moisture content in dried gel (%)	Aktywność wody w suszonym żelu Water activity in dried gel	Czas suszenia Drying time (min)	Skurcz $S_v$ Shrinkage $S_v$
30	13,40 ± 0,95	0,713 ± 0,044	245	0,945 ± 0,014
50	9,76 ± 1,25	0,520 ± 0,109	165	0,945 ± 0,021
70	10,01 ± 1,10	0,528 ± 0,094	97	0,945 ± 0,024
80	10,11 ± 1,14	0,488 ± 0,095	97	0,950 ± 0,031

Wang i Brennan [19] badali natomiast skurcz ziemniaków podczas suszenia konwekcyjnego w zakresie temperatur 40-70°C. Stwierdzili, iż stopień skurczu ziemniaka był większy przy suszeniu w niższej temperaturze. Niska temperatura suszenia żeli agarowych wpływała na mniejszy skurcz w przekroju materiału, ale kształtowała większy skurcz wysokości kostek. Zmiany w strukturze i jej zapadanie, oraz wynikająca z tych zjawisk mniejsza szybkość suszenia decydowały o większej końcowej zawartości wody w żelu suszonym w temperaturze 30°C.



**Rys. 3.** Wpływ temperatury suszenia na krzywe ściskania żeli suszonych do równowagowej zawartości wody

**Fig. 3.** Effect of drying temperature on compression curves of gels dried to equilibrium water content

Wyniki testów mechanicznych uzyskane dla materiałów suszonych do równowagowej zawartości wody przedstawiono na rysunku 3. Krzywe ściskania uzyskane dla żeli suszonych w temp. 70 i 80°C nie różnią się statystycznie. Lewicki i Łukaszyk [7] zaobserwowali, że krzywa ściskania ma wklęsły charakter i biegnie ku dołowi do momentu osiągnięcia przez materiał zawartości wody  $2,5 \text{ g wody} \cdot (\text{g s.s.})^{-1}$  (około 70% wilgotność). Test ściskania żelu suszonego w temperaturze 30°C przedstawia wklęsły charakter krzywej przy małych odkształceniach, kształt ten jest charakterystyczny dla materiałów o dużej wilgotności. Przy większym odkształceniu materiału (powyżej 0,1) krzywa ściskania ma prostoliniowy przebieg. Końcowa wartość napężenia uzyskana przy odkształceniu 0,2 dla żelu suszonego w tempe-



raturze 30°C wynosiła  $1820,4 \pm 198,7$  kPa i nie różniła się statystycznie istotnie od naprężenia  $1878,6 \pm 278,4$  kPa otrzymanego dla żelu suszonego w temperaturze 80°C. Krzywe ściskania żeli suszonych w 30 i 80°C miały jednak różny przebieg, co świadczyć może o różnej strukturze materiału.

Wyraźne różnice w odporności materiału na działającą siłę objawia się innym przebiegiem odkształcenia żelu suszonego w temperaturze 50°C, mimo, że materiał ten miał zbliżoną zawartość wody do próbek suszonych w 70 i 80°C. Krzywa ściskania żelu suszonego w 50°C jest najniższej położoną, a wartość końcowego naprężenia jest prawie dwukrotnie mniejsza niż dla pozostałych materiałów.

Temperatura procesu podczas suszenia konwekcyjnego do równowagowej zawartości wody może mieć istotny wpływ na strukturę i właściwości mechaniczne materiału. McMinn i Magee [11] porównali próbki ziemniaków suszonych w różnych temperaturach do tej samej zawartości końcowej wody, stwierdzili, że podniesienie temperatury powietrza suszącego z 30°C do 60°C wpływało na uzyskanie zewnętrznej usztywnionej warstwy produktu, dla suszonych jabłek wzrost sztywności obserwowano przy podwyższeniu temperaturze z 70 do 80°C [6]. W zależności od rodzaju badanego materiału i jego wrażliwości na temperaturę, obserwowano zmiany właściwości mechanicznych w różnych zakresach temperatury suszenia. Symulacja zmian zachodzących w żywności podczas suszenia jest niezwykle trudna [5], m.in. ze względu na inną strukturalną deformację tkanki niż modelu żelowego produktu spożywczego, co wpływa na migrację wody i decyduje o szybkości suszenia

Praca ściskania wskazuje na statystycznie istotne różnice między żelami suszonymi w temperaturze 70 i 80°C a żelem uzyskanym w temperaturze 30°C (rys. 2). Wartość naprężenia zarejestrowana przy  $\varepsilon_o = 0,2$  dla żeli suszonych w wysokiej temperaturze była średnio o 30% większa od wartości uzyskanej w temperaturze 30°C. Najbardziej miękkim żelem był materiał suszony w temperaturze 50°C, dla którego wartość pracy ściskania była o 40% mniejsza od uzyskanej dla żelu suszonego w temperaturze 30°C.

Dla żeli suszonych do równowagowej zawartości wody w temperaturach 50, 70 i 80°C obserwowano wzrost odporności na ściskanie, związany z usztywnieniem struktury. Żel suszony w temp. 50°C mimo, niskiej zawartości wody był materiałem miękkim. Największy skurcz żelu suszonego do 20% zawartości wody w temperaturze 50°C (0,94). Dalsze usuwanie wody w nie wpływało istotnie na skurcz żelu, którego końcowa wartość wynosiła 0,945. Duży skurcz w początkowym etapie utrudniał usuwanie wody, decydował o tworzeniu wewnętrznej gumiatej struktury. Kształt krzywej ściskania żelu suszonego w temperaturze 50°C był zbliżony do krzywej uzyskanej dla żelu agarowego przed suszeniem, mniejsze wartości naprężeń, mała sztywność materiału, świadczyć mogą o mniejszej zmianie struktur wewnętrznych niż podczas suszenia w temperaturze 70 i 80°C.

Temperatura jest jednym z czynników wpływających na strukturalne zmiany amorficznej części struktury produktu. Willis i in. [20] obserwowali, że podczas suszenia makaronu w niskiej temperaturze 40°C pojawiało się utwardzenie materiału ze względu na zachodzące przejście fazowe w powierzchni materiału. Podczas suszenia żeli w temperaturze 30°C do równowagowej zawartości wody przy małych wartościach odkształcenia (rys. 3) obserwowano ugięcie materiału i małe wartości naprężeń, co może wskazywać na miękkie wnętrze materiału. Wysoka wartość naprężenia przy odkształceniu 0,2 wskazywała na usztywnioną powierzchnię, praca ściskania świadczyła o znacznej twardości materiału spowodowanej zniszczeniem struktur wewnętrznych i możliwymi przemianami biopolimerów.

#### WNIOSKI

1. Wpływ temperatury suszenia na właściwości mechaniczne modelowego żelu agarowego nie był jednoznaczny. Stopień usunięcia wody z materiału i końcowa zawartość wody odgrywały znaczącą rolę w kształtowaniu skurczu i odporności materiału na ściskanie.

2. Przy suszeniu do 20% zawartości wody obserwowano mniejszy skurcz materiału suszonego w temperaturze 30 i 80°C. Żele suszone w 50 i 80°C były materiałami o obniżonej odporności na ściskanie, a ich wilgotność nieznacznie przekraczała 25%. Żele suszone w temperaturze 30 i 70°C o niższej zawartości wody bliskiej 21% charakteryzował się większą wytrzymałością.

3. Przy częściowym usunięciu wody z materiału, istotną rolę w kształtowaniu cech mechanicznych odgrywać może raczej wilgotność suszu, niż zastosowana temperatura suszenia.

4. Przy suszeniu żelu do równowagowej zawartości wody, istotny był wpływ temperatury suszenia. Największe obniżenie odporności oraz małe wartości naprężeń rejestrowano podczas ściskania żelu suszonego w temperaturze 50°C, co może świadczyć o słabym usztywnieniu struktur tkankowych.

5. Wzrost odporności na ściskanie żeli suszonych do równowagowej zawartości wody obserwowano przy podwyższeniu temperatury suszenia do 70 i 80°C. Spowolniony proces usuwania wody w temperaturze 30°C wpływał na zapadanie struktur wewnętrznych, zmniejszenie wysokości, a przemiany cukrów mogły mieć istotny wpływ na usztywnienie powierzchni i utwardzenie struktury.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Del Valle J. M., Cuadros T. R. M., Aguilera J. M.:** Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Res. Int.*, 31(3), 191-204, 1998.

2. **Gibson L.J., Ashby M.F.:** Cellular Solids Structure and Properties. Cambridge University Press, UK, 1997.
3. **Jakubczyk E., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P.:** Właściwości mechaniczne suszonego modelu tkanki jabłka. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 25, 27-36, 1999.
4. **Karel M.:** Teoria procesów suszenia. W: Nowe metody zagęszczania i suszenia żywności (ed. A. Spicer), WNT, Warszawa, 53-100, 1980.
5. **Lamb J., Göğüş F.:** Choice of model gel systems for the food dehydration studies. Drying Technology, 16 (1/2), 297-309, 1998.
6. **Lewicki P.P., Jakubczyk E.:** Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. J Food Eng., 64, 307-314, 2004.
7. **Lewicki P.P., Łukaszuk A.:** Changes of rheological properties of apple tissue undergoing convective drying. Drying Technology, 18(3), 707-722, 2000.
8. **Marousis S.N., Karathanos V.T., Saravacos G.D.:** Effect of sugars on the water diffusivity in hydrated granular starches. J. Food Sci., 54, 1496-1500, 1552, 1989.
9. **Mayor L., Sereno A.M.:** Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. J. Food Eng., 61, 373-386, 2004.
10. **Mazza G.:** Dehydration of carrots. Effect of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. J. Food Technol., 18(1), 113-123, 1983.
11. **McMinn W.A.M., Magee T.R.A.:** Physical characteristics of dehydrated potatoes- Part II. J. Food Eng., 33, 49-55, 1997.
12. **Nussinovitch A., Corradini M.G., Normand M.D., Peleg M.:** Effect of sucrose on the mechanical and acoustic properties of freeze-dried agar,  $\kappa$ -carrageenan and gellan gels. J. Texture Stud., 31, 205-223, 2000.
13. **Pendlight S., Ward J.P.:** Histological examination of some air dried and freeze dried vegetables. In: Proceedings First Int. Congress Food Sci. and Technol. (ed. J.M. Leich). Gordon and Breach Sci. Publ., London, vol. 4, 55-64, 1965.
14. **Ratti C.:** Shrinkage during drying of foodstuffs. J. Food Eng., 23, 91-105, 1994.
15. **Schrader G. W., Litchfield J.B.:** Moisture profiles in model food gel during drying: measurement using magnetic resonance imaging and evaluation of the Fickian model. Drying Technology, 10(2), 295-332, 1992.
16. **Simal S., Deyá E., Frau M., Rosselló C.:** Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple curves. J. Food Eng., 33, 139-150, 1997.
17. **Sullivan J.F., Craig J. C. Jr.:** The development of explosion puffing. Food Technology, 38 (2), 52-55, 131, 1984.
18. **Van Arsdel W.B.:** Drying Phenomena: In: Food Dehydration (eds. W.B. Van Arsdel, M.J. Copley, A.I. Morgan), Avi Publishing Company, Westport, vol. 1, 22-27, 1973.
19. **Wang N., Brennan J.G.:** Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. J. Food Eng., 24, 61-76, 1995.
20. **Willis C.A., Okos M., Campanella O.:** Effect of glass transition on stress development during drying of shrinkage food system. In: Proceedings of Sixth Conference of Food Engineering, (CoFE'99), Dallass, TX, 496-451, 1999.

## EFFECT OF DRYING TEMPERATURE AND WATER CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF MODEL AGAR GEL

*Ewa Jakubczyk, Marek Pokrzywnicki*

Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw Agricultural University  
ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa  
e-mail: jakubczyk@alpha.sggw.waw.pl

**Abstract.** The aim of this work was to determine the effect of temperature and water content on the mechanical properties of convection dried model gel. Model gels were dried to stable mass and to 20% of water content. Gels, dried at temperatures between 30 and 80°C, were examined for volumetric shrinkage and mechanical properties which were measured by compression test. Analysis showed that final water content affected the mechanical properties of gel dried to 20% moisture to a much greater degree in comparison to drying temperature. Drying to stable mass at 50°C caused a decrease of compression resistance. Increase of mechanical resistance was observed for samples dried at 70 and 80°C. The collapse of internal structures, stiffening of sample layer and hardening of gel were the results of low drying rate during drying at 30°C.

**Key words:** convection drying, agar gel, shrinkage, mechanical properties