

## CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŻELU AGAROWEGO ZE ZRÓŻNICOWANYM DODATKIEM SUBSTANCJI SŁODZĄCYCH

Ewa Jakubczyk, Ewa Gondek, Anna Żelazny  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Celem pracy było określenie wpływu stężenia agaru oraz dodatku substancji słodzącej na właściwości mechaniczne żelu. Badano aktywność wody i wskaźnik synerezy żeli o zróżnicowanym stężeniu agaru w zakresie 0,5–5%. Wyznaczono również wybrane cechy żeli agarowych z dodatkiem fruktozy, glukozy i sorbitolu. Właściwości mechaniczne żelu badano w teście ściskania, analizując siłę przy odkształceniu  $\varepsilon = 15\%$  oraz moduł sprężystości. Wzrost stężenia agaru wpływał na uzyskanie sprężystego, stabilniejszego żelu, o większej wytrzymałości mechanicznej, mniej podatnego na synerezę. Dodatek substancji słodzącej w zakresie do 20% powodował wzrost siły i modułu sprężystości żelu agarowego. Zwiększenie stężenia tych substancji w zakresie od 20 do 60% prowadziło do zmniejszenia odporności i stabilności żelu. Wśród badanych substancji słodzących żel z fruktozą był mniej podatny na synerezę i twardszy niż żel z fruktozą czy sorbitolem.

**Słowa kluczowe:** żel agarowy, substancje słodzące, właściwości mechaniczne

### WSTĘP

Żele hydrokoloidowe są przestrzennymi uporządkowanymi strukturami biopolimerowymi powstałymi w wyniku interakcji sąsiadujących cząsteczek. Uzyskana w wyniku żelowania spójna matryca ma zdolność zatrzymywania wody wraz ze składnikami w niej rozpuszczonymi. Powstałe wiązania wewnętrzne, tworzące strukturę żelu, determinują jego stabilność i właściwości mechaniczne [Dłużewska i Krygier 2007]. Zmiany, jakie zachodzą podczas żelowania hydrokoloidów, warunkowane są m.in. stężeniem substancji żelującej, pH, temperaturą i obecnością jonów, np. wapnia [Nussinowitsch i in. 1990].

Przemysł spożywczy wykorzystuje wiele substancji żelujących, które w zależności od stężenia i warunków sporządzenia żelu mogą tworzyć struktury o zróżnicowanej

teksturze – od miękkiej, sprężystej, do twardej czy kruchej [Imeson 2010]. Wśród szerokiej gamy roślinnych hydrokoloidów wykorzystywanych w przemyśle spożywczym na uwagę zasługuje agar, który jest substancją zagęszczającą, żelującą i stabilizującą, stosowaną w produkcji galaretek, nadziei do ciast, „ptasiego mleczka”, dżemów, ale również deserów mlecznych czy konserw mięsnych [Świdorski i Waszkiewicz-Robak 2003]. Agar tworzy żel kruchy, mniej sprężysty niż żelatynowy, ale twardszy niż pektynowy. Niskie koszty produkcji agaru oraz łatwość sporządzenia żelu, który nie wymaga obecności dodatkowych kationów podczas żelowania, sprawiają, że substancja ta jest szeroko stosowana, szczególnie w produkcji żywności przeznaczonej dla wegetarian, jako zamiennik żelatyny [Imeson 2010, Banerjee i Bhattacharya 2011].

Właściwości reologiczne żelu mogą zmieniać się istotnie podczas dochodzenia do fizykochemicznej równowagi materiału. W czasie przechowywania żelu w wyniku łączenia się łańcuchów polimerowych może zachodzić zjawisko synerезy, polegające na samoczynnym wycieku wody z żelu, co negatywnie wpływa na jego jakość i zachowanie struktury. Zmniejszona zdolność do utrzymywania wody i obniżenie sztywności żelu mogą być również spowodowane jego odkształceniem lub wahaniami temperatury [Nussinowitsch i Peleg 1990, Zúñiga i Aguilera 2008]. Zwiększenie stężenia substancji żelującej w przypadku większości stosowanych hydrokoloidów wpływa na zwiększenie wytrzymałości i stabilności żelu oraz zmniejszenie jego podatności na synerезę [Nussinowitsch i in. 1990]. Ocena wycieku rozpuszczalnika z żelu podczas przechowywania jest istotnym wskaźnikiem jego jakości i możliwości wykorzystania danej substancji żelującej w produkcji przemysłowej [Imeson 2010].

Właściwości mechaniczne żelu są determinowane rodzajem zastosowanej substancji żelującej, jej stężeniem i obecnością innych składników, np. cukrów. Niektórzy autorzy wykazali, że zastosowanie określonych substancji słodzących w produkcji galaretek może istotnie wpływać na cechy mechaniczne i stabilność żelu [Nussinowitsch i Peleg 1990, Deszczynski i in. 2003, Kusińska i Wawryniuk 2006, Bayarri i in. 2006]. Żel agarowy z 50-procentowym dodatkiem sacharozy charakteryzował się zwiększoną wytrzymałością mechaniczną o 25–45% w porównaniu z żelem agarowym sporządzonym bez środków słodzących. W przypadku zastosowania glukozy wytrzymałość żelu zwiększała się w zakresie stężeń od 19 do 34%, a wzrost ten był zależny od rodzaju i źródła pochodzenia agaru [Meena i in. 2006]. Bayarri i in. [2006], badając różne żeły hydrokoloidowe, obserwowali wzrost ich wytrzymałości wraz ze zwiększeniem stężenia sacharozy, natomiast dodatek aspartamu nie wpływał istotnie na cechy mechaniczne żelu.

W produkcji przemysłowej galaretek, cukierków i deserów cukier jest często dodawany w dużej ilości, co ma wpływ nie tylko na smak tych wyrobów, ale również na ich teksturę. Ze względów żywieniowych dąży się do ograniczania dodatku sacharozy lub wprowadzenia jej zamienników.

Jednym z środków słodzących, który stosuje się w żywności przeznaczonej dla diabetyków jest fruktoza, która wchłania się wolniej niż sacharoza, dzięki czemu nie podnosi gwałtownie poziomu glukozy w surowicy krwi. Inną powszechnie stosowaną substancją słodzącą, o mniejszej słodczy niż fruktoza, jest sorbitol, jest on tylko częściowo wchłaniany przez jelito cienkie, a niezabsorbowana jego część ulega fermentacji, metabolity zaś są częściowo absorbowane w dolnym odcinku jelita grubego lub

wydalane z organizmu. Sorbitol pełni również rolę wypełniacza i czynnika tekstotwórczego [Zduńczyk 2002, Waszkiewicz-Robak 2003].

Celem pracy było określenie wpływu stężenia agaru oraz dodatku substancji słodzącej na właściwości mechaniczne żelu.

## MATERIAŁY I METODY

Materiał badawczy stanowił żel agarowy o stężeniu masowym agaru (agar 1000, Hortimex, Polska) wynoszącym: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 i 5,0%. Mieszaninę wody destylowanej i agaru ogrzewano do temperatury 85°C, uzyskując klarowny roztwór, który wylewano na szalki Petriego i przechowywano w temperaturze 4°C przez kilka godzin w celu całkowitego zestalenia. Przygotowano również 1-procentowy żel agarowy z dodatkiem substancji słodzących: glukozy krystalicznej (Amylum Bulgaria Ead, Bułgaria), fruktozy krystalicznej (Gadot Biochemical Industries Ltd, Izrael) lub sorbitolu (D-sorbitol 97%, Sigma Aldrich, Dania), których udział masowy wynosił 10, 20, 40, 50 i 60%. Substancje słodzące dodawano do gorącego zolu agarowego (85°C), który mieszano i ogrzewano do wrzenia. Uzyskany roztwór wlewano na szalki Petriego i pozostawiano do zestalenia. Z otrzymanego żelu agarowego z dodatkiem lub bez dodatku substancji słodzącej wycinano kostki o boku 8 mm. Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono za pomocą teksturometru TA-XT2i (Stable Micro Systems, Wielka Brytania). Testy ściskania wykonano w 10 powtórzeniach (z dokładnością  $\pm 0,01$  N) do 80-procentowego odkształcenia materiału, z prędkością  $0,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Określono siłę  $F_{15}$  [N] oraz pracę ściskania  $P_{15}$  [mJ] przy odkształceniu żelu  $\varepsilon = 15\%$ .

Odkształcenie ( $\varepsilon$ ) obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon = \left( \frac{l_o - l}{l_o} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $l_o$  – wysokość materiału przed ściśnięciem [m],  
 $l$  – wysokość materiału po ściśnięciu [m].

Pracę ściskania  $P$  [mJ] określono jako pole pod krzywą siła  $F$  [N] – przemieszczenie  $d$  [mm]. Naprężenie  $\sigma$  [Pa] wyliczono jako stosunek siły  $F$  [N] do pola przekroju poprzecznego materiału [m<sup>2</sup>]. Wyznaczono naprężenie  $\sigma_k$  [Pa] przy zniszczeniu żelu o różnym stężeniu agaru. Moduł sprężystości  $E$  [Pa] wyznaczono jako nachylenie prostoliniowego odcinka krzywej naprężenie  $\sigma$  [Pa] – odkształcenie  $\varepsilon$ .

Aktywność wody ( $a_w$ ) żelu rejestrowano za pomocą aparatu AquaLab CX-2 (Decagon Device Inc. USA) w temperaturze  $\sim 24^\circ\text{C}$ . Pomiar  $a_w$  wykonano w trzech powtórzeniach z dokładnością  $\pm 0,001$ .

Wskaźnik stopnia synerazy  $S$  [%] wyznaczono na podstawie wyników pomiaru masy próbki żelu po zestaleniu ( $m_o$ ) i po 24 h przechowywania żelu w temperaturze 4°C ( $m_i$ ) – przed pomiarem masy próbkę żelu osuszano bibułą – z następującego wzoru:

$$S = \left( \frac{m_o - m_i}{m_o} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Przeprowadzono analizę wariancji i porównanie średnich przy użyciu testu Tukey'a przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , z wykorzystaniem programu statystycznego Statgraphics Plus 4.1. Na rysunkach i w tabelach zamieszczono wartości średnie  $\pm$  odchylenie standardowe.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Aktywność wody jest istotnym parametrem niezbędnym w ocenie jakości i stabilności produktów spożywczych. W przypadku galaretek, żelków czy pianek cukierniczych o ich aktywności wody decyduje rodzaj substancji zagęszczającej i jej stężenie, obecność cukrów lub innych substancji słodzących. Aktywność wody badanych żeli wraz ze zwiększeniem stężenia agaru od 0,5 do 4% malała od 0,899 do 0,782, a podatność na synerżę zmniejszała się w zakresie od 6,5 do 2,4%, co związane było ze wzrostem zawartości suchej substancji w żelu (tab. 1).

Tabela 1. Wpływ stężenia agaru na wybrane właściwości fizyczne żelu  
Table 1. Effect of agar concentration on selected physical properties of gel

Stężenie agaru Agar concentration [%]	Aktywność wody Water activity ( $a_w$ )	Wskaźnik synerży Syneresis index [%]	Praca ściskania Compression work, $P_{15}$ [mJ]
0,5	0,899 $\pm$ 0,007 <sup>a</sup>	6,5 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	0,21 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>
1,0	0,854 $\pm$ 0,012 <sup>b</sup>	3,4 $\pm$ 0,3 <sup>bc</sup>	0,43 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>
2,0	0,824 $\pm$ 0,009 <sup>c</sup>	3,6 $\pm$ 0,1 <sup>c</sup>	1,69 $\pm$ 0,10 <sup>c</sup>
3,0	0,794 $\pm$ 0,010 <sup>d</sup>	3,0 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	2,87 $\pm$ 0,18 <sup>d</sup>
4,0	0,782 $\pm$ 0,014 <sup>d</sup>	2,4 $\pm$ 0,1 <sup>d</sup>	4,33 $\pm$ 0,24 <sup>e</sup>
5,0	0,790 $\pm$ 0,009 <sup>d</sup>	3,0 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	2,96 $\pm$ 0,36 <sup>d</sup>

Wartości średnie oznaczone taką samą literą (w kolumnach) nie różnią się między sobą statystycznie istotnie przy  $\alpha = 0,05$ .

Mean values followed by the same letter (vertically) do not differ significantly at  $\alpha = 0.05$ .

Żel sporządzony z substancją słodzącą charakteryzował się mniejszą aktywnością wody i mniejszym wyciekaniem wody niż żel agarowy (tab. 1 i 2). Zwiększenie dodatku fruktozy do 60% zmniejszyło aktywność wody żelu do 0,685, stosując zaś glukozę i sorbitol, uzyskano aktywność wody żelu, odpowiednio 0,701 i 0,742 (tab. 2). Ergun i in. [2010] analizowali aktywność wody różnych surowców i produktów cukierniczych – spośród badanych substancji słodzących najmniejszą aktywnością wody charakteryzował się nasycony roztwór fruktozy, a największą – roztwór glukozy. Wyniki niniejszej pracy potwierdzają, że zastosowanie fruktozy w żelach agarowych prowadziło do uzyskania żelu o mniejszej aktywności wody niż przy dodatku sorbitolu czy glukozy. Wilson [2007] podkreśla, że przy tym samym stężeniu roztwory fruktozy charakteryzują się mniejszą aktywnością wody niż sacharozy, co ma istotne znaczenie w produkcji słodczy. Zastosowanie dodatku fruktozy sprawia, że nawet przy mniejszych jej stężeniach produkty pozostają stabilne podczas przechowywania.

Wskaźnikiem stabilności żelu jest jego podatność na wydzielanie się wody. Zastosowanie fruktozy sprawiało, że żele z jej dodatkiem charakteryzowały się mniejszą

Tabela 2. Wpływ stężenia substancji słodzącej na wybrane właściwości fizyczne żelu  
 Table 2. Effect of sweetener concentration on selected physical properties of gel

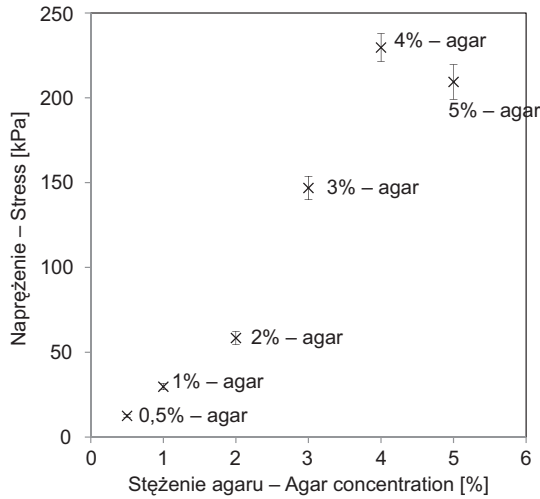
Dodatek substancji słodzącej Addition of sweetener [%]	Aktywność wody Water activity $a_w$	Wskaźnik synerезy Syneresis index [%]	Praca ściskania Compression work, $P_{15}$ [mJ]
Żel z dodatkiem fruktozy – Gel with fructose			
10	0,794 ±0,011 <sup>a</sup>	2,1 ±0,2 <sup>a</sup>	0,68 ±0,05 <sup>a</sup>
20	0,789 ±0,009 <sup>a</sup>	1,4 ±0,1 <sup>b</sup>	0,74 ±0,05 <sup>a</sup>
40	0,773 ±0,011 <sup>b</sup>	1,9 ±0,2 <sup>a</sup>	0,48 ±0,03 <sup>b</sup>
50	0,738 ±0,004 <sup>c</sup>	1,9 ±0,3 <sup>a</sup>	0,49 ±0,03 <sup>b</sup>
60	0,685 ±0,008 <sup>d</sup>	2,6 ±0,1 <sup>c</sup>	0,42 ±0,01 <sup>c</sup>
Żel z dodatkiem glukozy – Gel with glucose			
10	0,821 ±0,004 <sup>a</sup>	2,6 ±0,2 <sup>ac</sup>	0,58 ±0,02 <sup>a</sup>
20	0,801 ±0,005 <sup>b</sup>	1,7 ±0,3 <sup>b</sup>	0,61 ±0,06 <sup>a</sup>
40	0,768 ±0,012 <sup>c</sup>	2,4 ±0,1 <sup>a</sup>	0,44 ±0,03 <sup>b</sup>
50	0,714 ±0,014 <sup>d</sup>	2,8 ±0,2 <sup>c</sup>	0,38 ±0,05 <sup>b</sup>
60	0,701 ±0,012 <sup>d</sup>	2,5 ±0,3 <sup>ac</sup>	0,43 ±0,05 <sup>b</sup>
Żel z dodatkiem sorbitolu – Gel with sorbitol			
10	0,843 ±0,007 <sup>a</sup>	2,8 ±0,4 <sup>a</sup>	0,54 ±0,04 <sup>a</sup>
20	0,831 ±0,004 <sup>a</sup>	2,0 ±0,2 <sup>b</sup>	0,59 ±0,05 <sup>a</sup>
40	0,811 ±0,011 <sup>c</sup>	2,8 ±0,3 <sup>a</sup>	0,37 ±0,03 <sup>b</sup>
50	0,795 ±0,014 <sup>c</sup>	2,9 ±0,2 <sup>a</sup>	0,33 ±0,02 <sup>b</sup>
60	0,742 ±0,003 <sup>d</sup>	2,7 ±0,2 <sup>a</sup>	0,39 ±0,02 <sup>b</sup>

Wartości średnie oznaczone taką samą literą (w kolumnach – dla tej samej substancji słodzącej) nie różnią się między sobą statystycznie istotnie przy  $\alpha = 0,05$ .

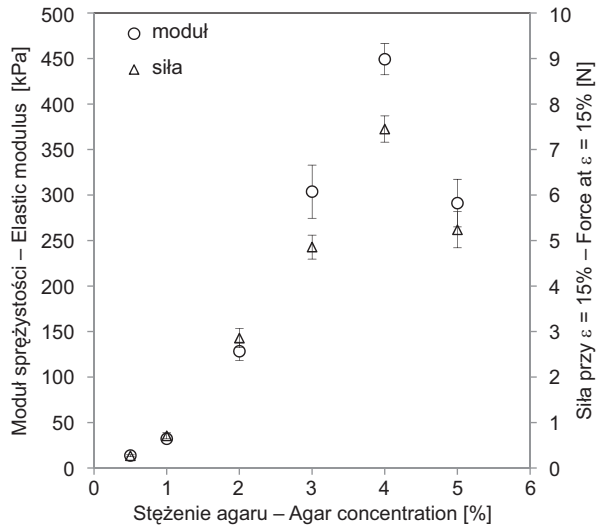
Mean values followed by the same letter (vertically – for the same sweetener) do not differ significantly at  $\alpha = 0.05$ .

synerезą niż żele z innymi substancjami słodzącymi przy tym samym ich stężeniu. Wpływ dodatku substancji słodzącej na synerезę żelu nie był jednoznaczny (tab. 2).

Właściwości mechaniczne żelu agarowego, zarówno z dodatkiem, jak i bez dodatku substancji słodzących, badano w teście ściskania. Zwiększenie stężenia agaru do 4% sprzyjało wzrostowi naprężenia przy zniszczeniu żelu (rys. 1), a wartości odkształcenia maksymalnego były zróżnicowane i niezależne od stężenia (nie zamieszczono danych). Dalsze zwiększenie dodatku agaru nie wpływało istotnie na naprężenie niszczące żelu. Wyniki te są zgodne z trendem obserwowanym przez innych autorów, którzy uzyskiwali wzrost naprężenia niszczącego przy zwiększaniu stężenia agaru, agarozy czy białka serwatkowego w żelu, co związane było ze zwiększeniem liczby interakcji między heliksami polimerów, prowadząc do wytworzenia zwartej, twardszej tekstury [Lowe i in. 2003, Barrangou i in. 2006, Banerjee i Bhattacharya 2011]. Analizując właściwości mechaniczne przy stałym odkształceniu żelu  $\varepsilon = 15\%$ , stwierdzono wzrost siły i modułu sprężystości (rys. 2) oraz pracy ściskania (tab. 1) przy zwiększeniu stężenia agaru w żelu od 0,5 do 4%. Zbyt wysokie stężenie środka żelującego może wpływać negatywnie na teksturę żelu, zmniejszając jego twardość, na skutek wytworzenia niejednorodnej struktury, co obserwowano w przypadku 5-procentowego żelu agarowego.



Rys. 1. Napężenie ( $\sigma_f$ ) przy zniszczeniu żelu o różnym stężeniu agaru  
 Fig. 1. Stress ( $\sigma_f$ ) at fracture of gel with different concentration of agar

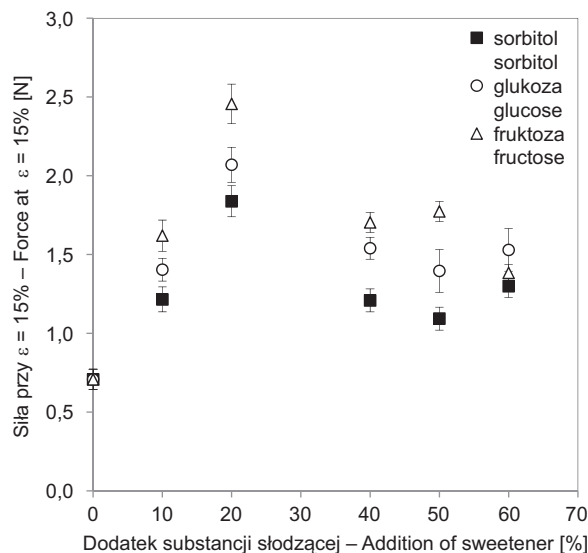


Rys. 2. Wpływ stężenia agaru w żelu na moduł sprężystości i siłę przy  $\epsilon = 15\%$   
 Fig. 2. Effect of agar concentration on the elastic modulus and force at  $\epsilon = 15\%$

Fonkwe i in. [2003] podkreślają, że przy niewielkim wzroście dodatku substancji żelującej może dochodzić do istotnego wzrostu sprężystości żelu. W niniejszej pracy zwiększenie stężenia agaru z 1 do 2% powodował ponad trzykrotne zwiększenie modułu sprężystości (rys. 2), co może wskazywać na wytworzenie stabilnej usieciowanej matrycy żelowej.

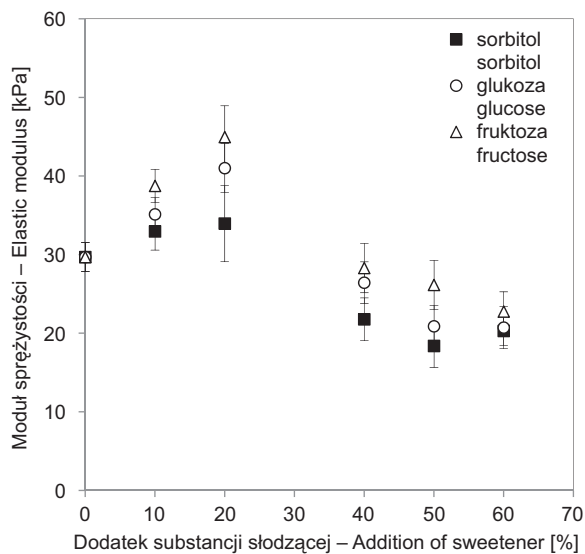
Wprowadzenie substancji słodzącej do struktury żelu agarowego istotnie wpływało na właściwości mechaniczne tak wytworzonego materiału. Bez względu na rodzaj substancji słodzącej, zwiększenie jej dodatku w żelu do 20% wpływało na stopniowy wzrost

siły przy odkształceniu  $\varepsilon = 15\%$  (rys. 3) oraz zwiększenie modułu sprężystości (rys. 4). Dalszy zwiększenie ilości cukrów lub sorbitolu w żelu powodował zmniejszenie wartości siły i modułu sprężystości. Badania niektórych autorów wykazały, że dodatek cukrów do żeli agarozowych czy karagenowych zwiększał ich wytrzymałość mechaniczną ze



Rys. 3. Wpływ dodatku substancji słodzącej na siłę przy 15-procentowym odkształceniu żelu agarowego

Fig. 3. Effect of sweetener addition on force at 15% strain of agar gel



Rys. 4. Wpływ dodatku substancji słodzącej na moduł sprężystości żelu agarowego

Fig. 4. Effect of sweetener addition on the elastic modulus of agar gel

względem na wzmocnienie wiązań wewnątrzcząsteczkowych i międzycząsteczkowych [Bayarri i in. 2003, Deszczynski i in. 2003, Normand i in. 2003]. Tang i in. [2001] oraz Fiszman i Duran [1992] uzyskali wzrost twardości żelu gellanowego przy zwiększeniu dodatku substancji słodzących do poziomu 35–40%, przy czym dalszy wzrost dodatku cukru powodował zmniejszenie wytrzymałości żelu. Maurer i in. [2012] podkreślają, że mechanizm żelowania agarozy w obecności substancji słodzących zależy od rodzaju substancji słodzącej, jej budowy chemicznej oraz masy cząsteczkowej. Autorzy wykazali, że zwiększenie dodatku sacharozy z 40 do 60% powodowało zmniejszenie sprężystości żelu, a zastosowanie fruktozy prowadziło do uzyskania stabilniejszego, bardziej sprężystego żelu. W roztworze sacharozowo-agarozowym, przy dużej liczbie molekuł cukrowych, to one wchodziły w reakcje z cząsteczkami wody, a nie agarozą. Ten rodzaj współzawodnicstwa o molekuły wody może wpływać na ograniczenie stopnia zjawisk konformacyjnych w roztworze polimeru.

Agar jest hydrokoloideem pochodzenia roślinnego składającym się z agarozy i agaropektyny, a jego właściwości determinowane są również źródłem jego pochodzenia. Obecność substancji słodzących wzmacniała strukturę żelu agarowego, ale w zakresie dużych stężeń substancji słodzących obserwowano nieznacznie osłabienie stabilności i sprężystości żelu. Przy dużym stężeniu cukrów dochodzi do wzrostu lepkości roztworu, co może mieć wpływ nie tylko na temperaturę żelowania, lecz również na uplastycznienie wytworzonego żelu.

Rodzaj zastosowanej substancji słodzącej miał również wpływ na cechy mechaniczne. Żel agarowy z fruktozą charakteryzował się wyraźnie większymi wartościami siły niż żel z glukozą (rys. 3). Zastąpienie cukrów polialkoholem w postaci sorbitolu wpływało na zmniejszenie odporności żelu na ściskanie. Wyniki te potwierdzają badania Kusińskiej i Wawryniuka [2006], w których uzyskano wyraźnie większe wartości siły cięcia i przebijania galaretek agarowych z fruktozą niż z sorbitolem.

Evageliou i in. [2010] uzyskali większe wartości naprężenia niszczącego w żelach gellanowych z fruktozą niż glukozą. Analogiczny wzmacniający wpływ fruktozy zaobserwowano również w niniejszej pracy w żelu agarozowym (rys. 3). Przy tej samej masie cząsteczkowej fruktozy i glukozy między cukrami istnieją różnice w przestrzennej konfiguracji, w której więcej grup hydroksylowych jest w pozycji ekwatorialnej z atomami tlenu w cząsteczkach glukozy, co ma wpływ na efektywniejsze wiązanie wody [Sworn i Kasapis 1998].

Analiza statystyczna wykazała brak wpływu rodzaju substancji słodzącej na wartość modułu sprężystości. Sprężystość żelu determinowała była głównie liczbą molekuł substancji słodzącej.

## WNIOSKI

1. Zwiększenie stężenia agaru do 4% powodowało istotne zmniejszenie aktywności wody żelu i ograniczenie stopnia jego synerezy oraz determinowało utworzenie stabilnej struktury żelowej, co miało wpływ na wzrost wytrzymałości mechanicznej i sprężystości żelu.



2. Dodatek substancji słodzącej zmniejszał aktywność wody żelu i zwiększał jego stabilność podczas przechowywania, poprzez lepsze wiązanie wody, dzięki obecności molekulek substancji słodzącej o małej masie cząsteczkowej.

3. Wprowadzenie cukrów i polialkoholu w strukturę żelu w ilości do 20% powodowało wzrost siły i modułu sprężystości żelu agarowego. Zwiększenie dodatku tych substancji w przedziale od 20 do 60% prowadziło do zmniejszenia odporności i stabilności żelu.

4. Wśród badanych substancji słodzących fruktoza dawała żel mniej podatny na syneresę i twardszy niż żel z glukozą czy sorbitolem.

## LITERATURA

- Banerjee S., Bhattacharya S., 2011. Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures. *J. Food Eng.* 102, 287–292.
- Barrangou L.M., Daubert C.R., Foegeding E.A., 2006. Textural properties of agarose gels. I. Rheological and fracture properties. *Food Hydrocolloids* 20, 184–195.
- Bayarri S., Durlan L., Costell E., 2003. Compression resistance, sweetener's diffusion and sweetness of hydrocolloids gels. *Int. Dairy J.* 13, 643–653.
- Bayarri S., Izquierdo L., Durán, L., Costell E., 2006. Effect of addition of sucrose and aspartame on the compression resistance of hydrocolloids gels. *Int. J. Food Sci. Tech.* 41, 980–986.
- Deszczynski M., Kasapis S., MacNaughton W., Mitchell J.R., 2003. Effect of sugars on the mechanical and thermal properties of agarose gels. *Food Hydrocolloids* 17, 793–799.
- Dłużewska E., Krygier K., 2007. Hydrokoloidy we współczesnej produkcji żywności. *Przem. Spoż.* 5, 12–16.
- Ergun R., Lietha R., Hartel R.W., 2010. Moisture and shelf life in sugar confections. *Crit. Rev. Food Sci.* 50, 162–192.
- Evageliou V., Mazioti M., Mandala I., Komaitis M., 2010. Compression of gellan gels. Part II: Effect of sugars. *Food Hydrocolloids* 24, 392–397.
- Fiszman S.M., Duran L., 1992. Effect of fruit pulp and sucrose on the compression response of different polysaccharides gel system. *Carbohydr. Polym.* 17, 11–17.
- Fonkwe L.G., Narsimhan G., Cha A.S., 2003. Characterization of gelation time and texture of gelatin and gelatin-polysaccharide mixed gels. *Food Hydrocolloids* 17, 871–883.
- Imeson A., 2010. Agar. In: *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*. Ed. A. Imeson. John Wiley & Sons, Singapore, 31–49.
- Kusińska E., Wawryniuk P., 2006. Wpływ dodatku substancji słodzących na wybrane właściwości mechaniczne i fizykochemiczne galaretek agarowych. *Inż. Rol.* 7 (82), 293–299.
- Lowe L.L., Foegeding E.A., Daubert C.R., 2003. Rheological properties of fine-stranded whey protein isolate gels. *Food Hydrocolloids* 17, 515–522.
- Maurer S., Junghans A., Vilgis T.A., 2012. Impact of xanthan gum, sucrose and fructose on the viscoelastic properties of agarose hydrogels. *Food Hydrocolloids* 29, 298–307.
- Meena R., Prasad K., Siddhanta A.K., 2006. Studies on “sugar-reactivity” of agars extracted from some Indian agarophytes. *Food Hydrocolloids* 20, 1206–1215.
- Normand V., Aymard P., Lootens D.L., Amici E., Plucknett K.P., Frith W.J., 2003. Effect of sucrose on agarose gels mechanical behaviour. *Carbohydr. Polym.* 54, 83–95.
- Nussinovitsch M., Peleg M., 1990. Mechanical properties of raspberry product texturized with alginate. *J. Food Process Pres.* 14, 267–278.

- Nussinovitsch M., Kaletunc M., Normand M.D., Peleg M., 1990. Recoverable work versus asymptotic relaxation modulus in agar, carrageenan and gellan gels. *J. Texture Stud.* 21, 427–438.
- Sworn G., Kasapis S., 1998. Effect of conformation and molecular weight of co-solute on the mechanical properties of gellan gum gels. *Food Hydrocolloids* 12, 283–290.
- Świdorski F., Waszkiewicz-Robak B., 2003. Hydrokoloidy jako substancje kształtujące strukturę. W: *Żywność wygodna i żywność funkcjonalna*. Red. F. Świdorski. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 45–63.
- Tang J., Mao R., Tung M.A., Swanson B.G., 2001. Gelling temperature, gel clarity and texture of gellan gels containing fructose or sucrose. *Carbohydr. Polym.* 44, 197–209.
- Waszkiewicz-Robak B., 2003. Substancje słodzące. W: *Żywność wygodna i żywność funkcjonalna*. Red. F. Świdorski. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 91–108.
- Wilson R., 2007. *Ingredients Handbook Sweeteners*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Zduńczyk Z., 2002. Odżywcze i zdrowotne właściwości substancji słodzących. W: *Sacharydy i substancje słodzące*. Red. A. Rutkowski. Polska Izba Dodatków do Żywności, Polskie Towarzystwo Technologów Żywności. Trans-Druk, Konin, 37–55.
- Zúñiga R.N., Aguilera J.M., 2008. Aerated food gels: fabrication and potential applications. *Trends Food Sci. Technol.* 19, 176–187.

## CHARACTERISTICS OF MECHANICAL PROPERTIES OF AGAR GEL WITH DIFFERENT ADDITION OF SWEETENERS

**Summary.** The aim of this work was to determine the effect of agar concentration and addition of sweeteners on the mechanical properties of gel. Gel properties (water activity, syneresis index) were examined under conditions of varying agar concentration (0.5–5%). The selected physical properties of agar gels with addition of fructose, glucose and sorbitol were determined. The investigations of mechanical properties were carried out by compression tests and force at strain of 15% and elastic modulus were analysed. Increasing concentrations of agar produced an increasingly stronger and more elastic gel with the lower extent of syneresis. Addition of sweeteners up to a concentration of 20%, resulted in increase in gel strength and elasticity. However, at concentrations beyond 20%, increasing addition of glucose, fructose and sorbitol decreased elastic modulus as well force at constant strain. Addition of fructose produced more stable and harder gel than the other two gels systems with fructose and sorbitol.

**Key words:** agar gel, sweeteners, mechanical properties