

## WPŁYW ROZMIESZCZENIA PORÓW W PRZEKROJU POPRZECZNYM NA WŁASNOŚCI TEKSTURALNE EKSTRUDATÓW ZBOŻOWYCH

*Tomasz Żelaziński, Adam Ekielski*

*Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

**Streszczenie.** Celem pracy było zbadanie wpływu rozmieszczenia porów w ekstrudowanych produktach kukurydzianych na wybrane własności teksturalne. Zakres pracy obejmował: pomiary porowatości oraz wytrzymałości ekstrudatów. Badania wykonano na kukurydzianych produktach komercyjnych oraz kukurydzianych produktach ekstrudowanych wytworzonych w warunkach laboratoryjnych z kaszki kukurydzianej. Poszczególne próbki ekstrudatu przecinano na trzy części i poddawano szczegółowej analizie obrazu, rozpatrując kolejne warstwy. Do analizy wykorzystano oprogramowanie LabView 7.1 z bibliotekami wizyjnymi oraz programem Vision Asistant 7.1.1. Określano ogólną powierzchnię porów na badanej powierzchni (%), liczbę porów na jednostkę powierzchni ( $\text{cm}^2$ ) oraz wykonano badania teksturalne. Stwierdzono, że porowatość poszczególnych warstw była różnorodna. Potwierdziła to zmienna, ogólna powierzchnia porów oraz wzrost porowatości wraz ze zbliżaniem się do środka ekstrudatu. Porowatość w każdej z analizowanych warstw była różna. Każda poddawana analizie warstwa charakteryzowała się inną wartością maksymalnej siły potrzebnej do jej przebiccia.

**Słowa kluczowe:** ekstruzja, porowatość, tekstura, LabView, analiza obrazu

### Wstęp

Wyroby ekstrudowane charakteryzują się zwykle bardzo rozwiniętą i zróżnicowaną wewnętrzną strukturą porowatą, która zamknięta jest w produktach o nadanym przez dysze ekstrudera kształcie. Pory mogą posiadać różny rozmiar, kształt, występować w różnej liczbie na określonej powierzchni czy różnić się grubością ścianek (Crowley i in., 2010; Hayter i in., 1986; Żelaziński, 2011). Wiadomo, że pory na zewnętrznej powierzchni ekstrudatów są spłaszczony, co jest efektem oddziaływania ścianek kanału wylotowego matrycy oraz dużej szybkości wymiany ciepła i masy występujących w warstwie przypowierzchniowej, a struktura porów wewnątrz ekstrudatu jest zwykle symetryczna (Desrumaux i in., 1998). Stopień deformacji zależy od ich składu surowcowego i stopnia ekspansji (Robin

i in., 2010; Hayter i in., 1989). Należy zwrócić uwagę, że wraz ze zmianami porowatości związane są takie parametry produktów ekstrudowanych, jak tekstura czy cechy sensoryczne (Agbisit i in., 2007; Ays,e i in., 2004; Biller i in., 2005; Biller, 2006; Ekielski i in. 2007; Lui i Peng, 2005; Wojtowicz i in., 2010; Żelaziński i Ekielski, 2012). Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że w literaturze znajduje się wiele publikacji na temat samej porowatości produktów spożywczych, w tym ekstrudowanych. Obejmują one jednak głównie badania liczby porów na powierzchni przekroju oraz ich zróżnicowania pod względem rozmiaru. Brak jest natomiast dokładnych badań, przedstawiających ich rozmieszczenie na powierzchni przekroju ekstrudatów, co z punktu widzenia jakości produktów może mieć istotne znaczenie.

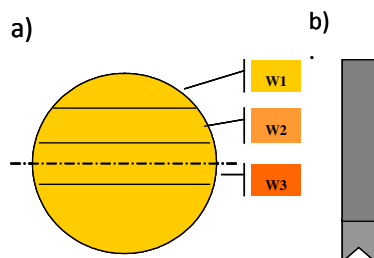
## Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie wpływu rozmieszczenia porów w ekstrudowanych produktach na wybrane własności teksturalne.

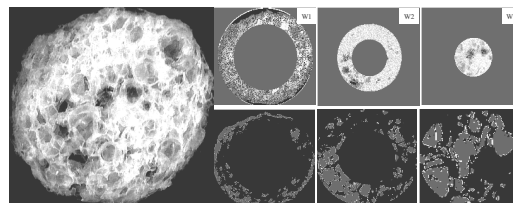
Zakres pracy obejmował pomiary porowatości oraz wytrzymałości ekstrudatów.

## Metodyka

Badania wykonano na kukurydzianych produktach ekstrudowanych, wytworzonych w warunkach laboratoryjnych z kaszki kukurydzianej (oznaczenie w tekście EK1) o wilgotności 13,2% i granulacji 250–750 µm (zawartość skrobi 75+/-5%, białko 8,3%, tłuszcz całkowity 0,7%). Ekstrudaty wytworzono na zmodyfikowanym ekstruderze jednoślimakowym KZM-2 o stosunku długości do średnicy ślimaka 6,5 i prędkości obrotowej ślimaka 200 obr · min<sup>-1</sup>. Temperatura wewnątrz cylindra ekstrudatu w sekcji uplastyczniania ekstrudatu osiągała ok. 125–130°C. Do badań wykorzystano dodatkowo komercyjny ekstrudat kukurydziany (skład: kaszka kukurydziana i sól) – „paluszki kukurydziane” firmy Eurosnack S.A. zakupione na rynku lokalnym (oznaczenie w tekście EK2). Badania przeprowadzono dla dwudziestu wybranych losowo ekstrudatów. Poszczególne próbki przecinano na trzy części i poddawano szczegółowej analizie obrazu, rozpatrując kolejne warstwy W1, W2 i W3 (rys.1a). Na powierzchni przekrojów ekstrudatu określano ogólną powierzchnię porów (%) oraz porowatość jako liczbę porów na jednostkę powierzchni (cm<sup>2</sup>). Badania porowatości wykonano na stanowisku badawczym do analizy obrazu wyposażonym w mikroskop i oprogramowanie do analizy zdjęć: mikroskop stereoskopowy Opta Tech SL + kamera 3 Mpixel. Zdjęcia zapisywano w formacie TIF w rozdzielczości 2048 x 1536. Porowatość określano według metody Gosselin i Rodrigue (2005), stosując nieregularną obwiednię analizowanej grupy porów powietrznych na analizowanych zdjęciach. Do analizy porowatości wykorzystano pakiet LabView 7.1 z bibliotekami wizyjnymi oraz programem Vision Assistant 7.1.1, gdzie zdjęcia transponowano do przestrzeni monochromatycznej i poddawano specjalistycznej obróbce graficznej. Następnie otrzymane obrazy o bajtowej skali szarości (256 odcieni) przekształcano w dwuwartościowe mapy bitowe i dobierano odpowiednie wartości progowe odcieni szarości z zakresu od 1–255 (threshold) (rys. 2).



Rysunek 1. a). Przykład wycinania warstw ekstrudatu, b). Przystawka walcowa do testów penetracji  
 Figure 1. a). Example of cutting layers of extrudate, b). A roller attachment for penetration tests



Rysunek 2. Powierzchnia badań porowatości ekstrudatu i dobór wartości progowych  
 Figure 2. The surface of research on porosity and selection of border values

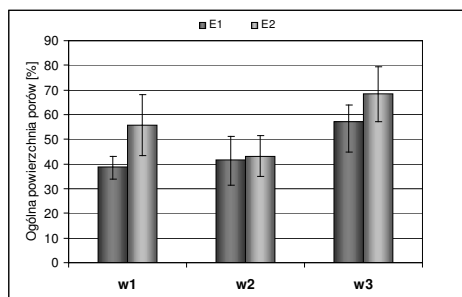
Poszczególne warstwy poddano badaniom tekstury z wykorzystaniem testu penetracji. Badania tekstury wykonano na stanowisku do badania siły Axis FA wyposażonym w głowicę 0,01 kN o dokładności 0,05 N i przystawkę z trzpieniem walcowym do testów penetracji (rys. 1b). Za wytrzymałość przyjęto wartość siły maksymalnej  $F_{max}$  (kN) potrzebnej do przebicia próbki.

Do projektowania eksperymentu wykorzystano Centralny Plan Kompozycyjny (CPK), o liczbie wielkości wejściowych 3, liczbie bloków 1 i liczbie układów 26 z powtórzeniem. Poszczególne poziomy zmienne zakodowano do wartości liczbowych jako wartości -1,0,1. W planie zastosowano dodatkowe powtórzenia w punkcie centralnym. Plan wygenerowano przy wykorzystaniu programu Statistica 10, który dalej posłużył do uzyskania powierzchni odpowiedzi. Do analizy istotności zmiennych zastosowano analizę wariancji ANOVA.

Do oceny statystycznej jakości dopasowania równań powierzchni odpowiedzi wykorzystano również współczynnik determinacji  $R^2$  oraz błąd średni kwadratowy MSE (ang. Mean Square Error).

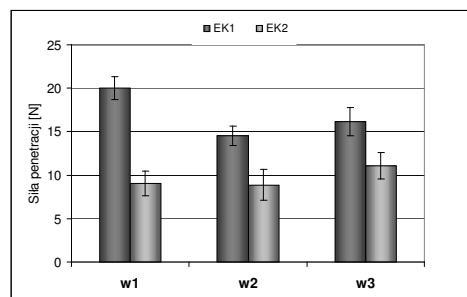
## Wyniki badań

Stwierdzono, że wszystkie analizowane próbki charakteryzowały się jednorodną budową o strukturze porowatej, charakterystycznej dla ekspandowanych produktów ekstrudowanych. Ogólna powierzchnia porów znajdująca się na powierzchni warstwy W1 i W2 zawierała się w granicach od ok. 40 do 42% dla ekstrudatów EK1 wykonanych w warunkach laboratoryjnych oraz do ok. 55% w pierwszej warstwie dla ekstrudatu komercyjnego (rys. 3). Analiza warstwy W3 wykazała, że w centralnej części ekstrudatu ogólna powierzchnia porów była największa i zajmowała ok. 57 do 69% dla ekstrudatu komercyjnego (rys. 3).



Rysunek 3. Zmiany ogólnej powierzchni porów poszczególnych warstw ekstrudatu

Figure 3. Changes of general area of pores of particular layers of extrudate



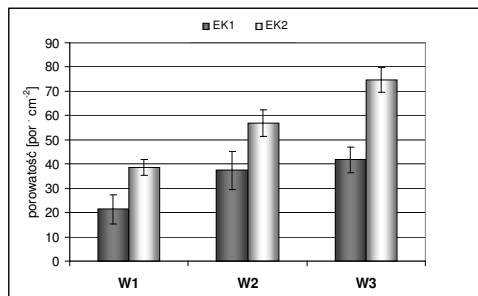
Rysunek 4. Zmiany wartości siły maksymalnej, potrzebnej do przebicia warstw ekstrudatów (kN)

Figure 4. Changes of the maximum strength value necessary to perforate the layer of extrudates (kN)

Analizując cechy teksturalne poszczególnych warstw (rys. 4), można stwierdzić, że pierwsza warstwa W1 ekstrudatu wykonanego w warunkach laboratoryjnych była wyraźnie najtwardsza. Maksymalna siła potrzebna do jej perforacji wynosiła około 20 N, kolejne warstwy charakteryzowały się mniejszą wytrzymałością, warstwa W3 była nieznacznie twardsza od warstwy W2.

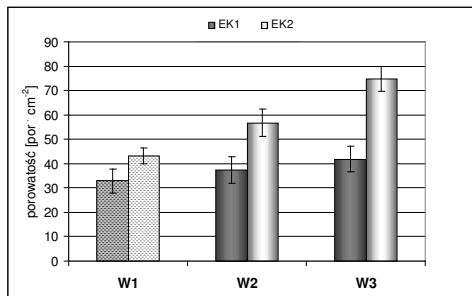
W przypadku ekstrudatu komercyjnego pierwsze dwie warstwy W1 i W2 charakteryzowały się zbliżoną twardością, natomiast najtwardsza okazała się warstwa W3, gdzie siła potrzebna do jej perforacji była większa o około 3 N. Taki rozkład wytrzymałości poszczególnych warstw może świadczyć o bardziej stabilnym przebiegu procesu w przypadku produktu komercyjnego. Dzięki temu uzyskano mniejsze zróżnicowanie wielkości porów, wynikające z bardziej efektywnego procesu przepływu energii wewnątrz ekstrudatu. Wyniki badań są zbliżone do wyników uzyskanych przez Robina i in. (2010).

Porównując porowatość poszczególnych warstw, można zauważyć, że parametr ten wyraźnie wzrastał wraz z kolejnymi warstwami w głąb ekstrudatu (rys. 5 i 6). Największą porowatością charakteryzowała się warstwa W3, co może wynikać ze znacznego rozdrobnienia porów w tej części ekstrudatu. W przypadku warstwy W1 porowatość była najmniejsza, co z kolei można tłumaczyć pozamykanymi porami na obwodzie ekstrudatu. Pory te zamykają wewnętrzną strukturę ekstrudatu, zatem warstwa ta może być najtwardsza tak, jak stwierdzono, analizując histogram (rys. 4). Pozamykane pory mogą sprawiać wrażenie calizny, przez co program komputerowy może je wykluczać. Na histogramie (rys. 6) przedstawiono zatem badania warstwy W1 przy zmniejszonych wartościach progowych ze 170 do 125. W przypadku warstwy W1 porowatość wzrastała dla dwóch analizowanych ekstrudatów, jednak ciągle pozostawała na mniejszym poziomie niż w przypadku warstwy W2 i W3.



Rysunek 5. Zmiany porowatości poszczególnych warstw ekstrudatów wykorzystywanych w badaniach (W1-W2-W3 threshold 170)

Figure 5. Changes of porosity of particular layers of extrudates used in the research (W1-W2-W3 threshold 170)



Rysunek 6. Zmiany porowatości poszczególnych warstw ekstrudatu (W1- threshold 125, W2,W3- threshold 170)

Figure 6. Changes of porosity of particular layers of extrudate (W1- threshold 125, W2,W3- threshold 170)

W celu zilustrowania charakteru wpływu i istotności poszczególnych zmiennych na analizowane parametry, wyniki parametrów poddano analizie wariancji oraz przedstawiono na wykresie powierzchni odpowiedzi.

Analizując uzyskane wyniki (tab. 1) można stwierdzić, że na przyjętym poziomie istotności 0,05 istotny okazał się wpływ siły penetracji<sup>2</sup> i porowatości oraz współdziałanie ogólnej pow. por. względem siły penetracji.

Tabela 1

Analiza wariancji ANOVA dla poziomów istotności wielkości: porowatości i siły penetracji próbek w warstwach ekstrudatu

Table 1

Analysis of variance ANOVA for levels of sizes significance: porosity and strength of samples penetration in the layers of extrudates

Parametr	SS	df	MS	F	p
Ogólna pow. por. (%)	1,34950	1	1,349501	3,497658	0,068436
Ogólna pow. Por <sup>2</sup> . (%)	0,89860	1	0,898595	2,328993	0,134480
Siła penetracji (N)	0,07457	1	0,074568	0,193267	0,662465
Siła penetracji <sup>2</sup> (N)	3,63032	1	3,630318	9,409116*	0,003770
Porowatość por. · cm <sup>-2</sup>	3,00137	1	3,001370	7,778999*	0,007911
Porowatość <sup>2</sup> por. · cm <sup>-2</sup>	0,04769	1	0,047689	0,123600	0,726920
Ogólna pow. por. wz. Siła penetracji	1,71323	1	1,713233	4,440383*	0,041110
Ogólna pow. por. wz.. Porowatość	0,25891	1	0,258913	0,671054	0,417309
Siła penetracji wz. Porowatość	0,15474	1	0,154740	0,401059	0,529977
Błąd	16,20486	42	0,385830		
Całk. SS	36,00000	51			

- Różnica istotna przy poziomie istotności p ≤ 0,05

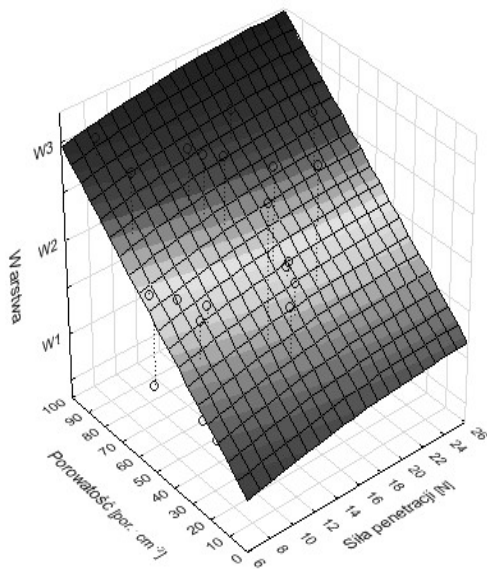
W dalszej analizie czynniki nieistotnie zostały pominięte, a dla czynników istotnych obliczono wartości współczynników regresji, określające wpływ badanych czynników dla poszczególnych warstw ekstrudatu W1, W2 i W3. Wykorzystując otrzymane wartości współczynników, opracowano równanie regresyjne (1), uwzględniające liniowy i kwadratowy wpływ badanych czynników. Uzyskaną postać równania charakteryzowały następujące współczynniki: determinacji  $R^2 = 0,549$ , oraz MSE = 0,386.

$$z = -1,35 - 0,00076 \cdot x^2 + 0,021 \cdot y + 0,00078 \cdot 50,16938 \cdot x \quad (1)$$

gdzie:

- x - siła penetracji (N)
- x - porowatość (por. · cm<sup>-2</sup>)
- z - warstwa

Opracowane równanie przedstawiono graficznie w postaci wykresu (rys. 7) w układzie x, y, z.



Rysunek 7. Dopasowana powierzchnia odpowiedzi przedstawiająca przewidywaną lokalizację warstw ekstrudatu w zależności od ich porowatości i siły penetracji

Figure 7. Adjusted area of answers presenting a forecast localization of layers of extrudates depending on their porosity and penetration force

Przebieg otrzymanej powierzchni potwierdza, że porowatość ekstrudatu wyraźnie wzrosła w miarę zbliżania się do środka ekstrudatu W3. Podobną tendencję można zauważyć przy badaniu maksymalnej siły potrzebnej do perforacji próbki.

## Wnioski

1. Badania wytrzymałości poszczególnych warstw ekstrudatu wykazały, że wytrzymałość ekstrudowanych wyrobów może być zmienna na całym analizowanym przekroju.

2. Porowatość poszczególnych warstw jest różnorodna, co potwierdza zmienna ogólna powierzchnia porów oraz wzrost porowatości wraz ze zbliżaniem się do środka ekstrudatu.
3. Wzrost wartości siły maksymalnej potrzebnej do perforacji próbki w środkowej części ekstrudatu nie jest cechą pozytywną i może świadczyć o braku homogeniczności przebiegu procesu w dyszy ekstrudera.
4. Analiza porowatości może być jedynie pomocniczym parametrem służącym do oceny profilu teksturalnego badanego ekstrudatu.

## Literatura

- Agbisit, R.; Alavi, S.; Cheng, E.; Herald, T.; Trater, A. (2007). Relationships between microstructure and mechanical properties of cellular cornstarch extrudates. *Journal of Texture Studies*, 38, 199-219.
- Billar, E.; Ekielski, A. (2005). Modelowanie cech teksturalnych pieczywa pszennego z wykorzystaniem wskaźnika dynamiki zmian barwy powierzchni w czasie obróbki termicznej. *Inżynieria Rolnicza*, 10(70), 23-31.
- Billar, E. (2006). Dynamika zmian barwy podczas obróbki termicznej pieczywa pszennego w zależności od czasu miesienia ciasta. *Inżynieria Rolnicza*, 7(82), 43-50
- Desrumaux, A.; Bouvier, J. M.; Burri, J. (1998). Corn grits particle size and distribution effect on the characteristic of expanded extrudates. *Journal of Food Science Engineering Processing*, 63(5), 857-863.
- Ekielski, A.; Majewski, Z.; Żelaziński, T. (2007). Effect of extrusion conditions on physical properties of buckwheat –maize blend extrudate. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 57, 2(A), 57-61.
- Emir, Ays\_e O' zer; S\_enol I' banog'lu; Paul Ainsworth; Cahide Yag'mur. (2004): Expansion characteristics of a nutritious extruded snack food using response surface methodology. *European Food Research and Technology*, 218(5), 474-479.
- Hayter, A. L.; Smith, A. C.; Richmond, P.; (1986). The physical properties of extruded food foams. *Journal of Materials Science*, 21(10), 3729-3736.
- Lui, W.-B.; Peng, J., (2005). Effects of operating conditions on degradable cushioning extrudate's cellular structure and the specific heat. *Journal of Food Engineering*, 70(2), 171-182.
- Robin, F.; Engmann, J.; Pineau, N.; Chanvrier, H.; Bovet, N.; Della Valle, G. (2010). Extrusion , structure and mechanical properties of complex starchy foams. *Journal of Food Engineering*, (98), 19-27.
- Singh, N.; Smith, A.C. (1997). A Comparison of wheat starch. Whole wheat meal and oat flour in the extrusion cooking process. *Journal of Food Engineering*, 34, 15-32.
- Wójtowicz, A.; Mościcki, L.; Mitrus, M.; Oniszczyk, T. (2010). Wpływ konfiguracji układu plastyfikującego na wybrane cechy ekstrudowanych makaronów pełnoziarnistych. *Inżynieria Rolnicza*, 4(122), 291-297.
- Żelaziński, T. (2011). Investigaton on porosity of extrudates at various buckwheat content in the mixture. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW*, 57, 49-55.
- Crowley, P.; Grau, H.; Arendt, E. K. (2000). Influence of Additives and Mixing Time on Crumb Grain Characteristics of Wheat Bread. *Cereal Chemistry*, 77(3), 370-375.
- Gosselin, R.; Rodrigue, D. (2005). Cell morphology analysis of density polymer foams. *Polymer Testing*, 24, 1027-1035.
- Żelaziński, T.; Ekielski, A. (2012). Badania sensoryczne ekstrudatów kukurydziano - zbożowych. *Postępy techniki przetwórstwa spożywczego*, 1, 50-54.

## **EFFECT OF THE PORES DISTRIBUTION IN TRANSVERSE SECTION ON TEXTURAL PROPERTY OF CEREAL EXTRUDATE**

**Abstract.** The objective of the paper was to investigate distribution of pores in the extruded maize products on the selected textural properties. The scope of the paper included: porosity measurements and extrudates resistance. The research was carried out on maize commercial products and maize extrudated products produced in laboratory conditions from maize groats. Particular samples of extrudate were cut on three parts and subjected to detailed analysis of the image taking into consideration subsequent layers. LabView 7.1. software was applied in analysis with vision libraries and Vision Assistant 7.1.1. software. General number of pores in the researched area was determined (%), number of pores per a unit of area ( $\text{cm}^2$ ) and textural research was carried out. It was determined that porosity of particular layers was varied. A variable general surface area of pores was confirmed and the increase of porosity along with getting closer to the centre of the extrudate. Porosity was different in each analysed layer. Each layer subjected to analysis was characterised with other maximum value of strength necessary to its perforation.

**Key words:** extrusion, porosity, texture, LabView, vision image

**Adres do korespondencji:**

Tomasz Żelaziński; email [tomasz\\_zelazinski@sggw.pl](mailto:tomasz_zelazinski@sggw.pl)  
Katedra Organizacji i inżynierii Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
ul. Nowoursynowska 164  
02-787 Warszawa