

## THE EFFECT OF EXTRUDATE FINENESS ON THE SHAPE OF PARTICLES OBTAINED / WPLYW STOPNIA ROZDROBNIENIA EKSTRUDATU NA KSZTAŁT UZYSKANYCH CZĄSTEK

PhD. Eng. Ekielski A., PhD. Eng. Żelaziński T., PhD. Stud. Eng Zdanowska P.,  
PhD. Stud. Eng. Florczak I.

Warsaw University of Life Sciences, Faculty of Production Engineering, Warsaw / Poland  
Tel: +48 22 59 345 00; e-mail: adam\_ekielski@sggw.pl

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the influence of the grounded extrudate fraction on the obtained particles' shape and attempt to link these characteristics with the quality of the extrudate from which they were originated. The material used in the study was the wheat-corn extrudate produced in the twin-screw extruder at 130, 140 and 150°C. The extrudates were grounded in the hammer shredder and then particles were separated on a laboratory sieve sifter. It was extrudate porosity and ground particle shape investigated. It was found that the products obtained in the twin-screw extruder at different temperatures of the process are distinguished by the variable internal structure which can affect obtaining extrudate fractions with varying percentage of particles and the shape of the extrudate after grinding. It was observed that the smallest and largest extrudate fractions were ground the most. Elongation factor showed an increase in the length of the fraction obtained with the reduction of extrudate particles size. Differentiation of the shape could be important because of the sensory evaluation of the products carried by consumers, and consequently it could be a very valuable insight for future producers of such products.

**Keywords:** food extrusion, grinding, breadcrumbs, shape

### INTRODUCTION

A characteristic feature of extruded products is mostly the porous, expanded and highly differentiated internal structure. The pores in these products may have a different size, shape, occurring in varying numbers in a defined area, or differing with wall thickness. Their quality depends on many factors, which is the subject of many research works (Hayter et al., 1986; Mezreb et al., 2003; Włodarczyk-Stasiak, Jamroz, 2009; Crowley et al., 2010; Żelazinski, 2011; Bisharat et al., 2013).

It has been proven that the pores surrounding the outside of the extrudate are flattened, which may be due to the influence of the walls of the matrix outlet channel and the high speed of heat and mass transfer occurring in the surface layer. As approaching the center, the internal pore structure of the extrudate is usually symmetrical, but their size and shape can varied (Desrumaux et al., 1998, Ekielski, Żelaziński 2012). According to Lui and Peng (2005) and Desrumaux et al. (1998), changes in porosity affect the textural characteristics of extruded products. Lanuay et al. (1983) noted that the porosity has also a significant impact on the sensory evaluation - with increase of the pore size product crispness increases. This process is not entirely understood and still raises the interest of many authors (Desrumaux et al, 1998; Ays,e et al., 2004; Lui and Peng, 2005; Biller et al., 2005; Biller, 2006; Agbisit et al., 2007; Wojtowicz et al., 2010; Żelaziński, 2011).

Therefore, the distinctive structure of the products obtained by extrusion can have a significant effect on further processing, e.g. by grinding for breadcrumbs. Currently, these products pose a number of requirements

**Abstrakt:** Celem pracy było zbadanie wpływu stopnia rozdrobnienia ekstrudatu na kształt uzyskanych cząstek i próba powiązania tych cech z jakością ekstrudatu z którego powstały. Materiałem wykorzystywanym w badaniach był ekstrudat pszenno-kukurydziany wyprodukowany na współbieżnym ekstruderze dwuślimakowym w temperaturze 130, 140 i 150 °C. Wytworzone ekstrudaty rozdrobniono na rozdrabniaczu bijakowym, a następnie przeprowadzono separację cząstek na laboratoryjnym przesiewaczu sitowym. Badano porowatość ekstrudatu oraz kształt cząstek rozdrobnionego ekstrudatu. Stwierdzono, że produkty uzyskane na ekstruderze dwuślimakowym w różnych temperaturach procesu wyróżniają się zmienną strukturą wewnętrzną, co może mieć wpływ na uzyskanie frakcji ekstrudatu o różnym procentowym udziale oraz na kształt cząstek ekstrudatu po ich rozdrobnieniu. Zaobserwowano, że najmniejsze i największe frakcje ekstrudatu były najbardziej okrągłe. Współczynnik wydłużenia wskazywał natomiast na wzrost długości uzyskanych frakcji wraz ze zmniejszeniem cząstek ekstrudatu. Zróżnicowanie kształtu może być istotne ze względu na ocenę sensoryczną produktów dokonywaną przez odbiorców, w konsekwencji może być to niezwykle cenne spostrzeżenie dla przyszłych producentów tego typu produktów.

**Słowa kluczowe:** ekstruzja, rozdrobnienie, panier, kształt

### WSTĘP

Cechą charakterystyczną wyrobów ekstrudowanych jest głównie porowata, rozwinięta i bardzo zróżnicowana wewnętrzna struktura. Pory w tych produktach mogą posiadać różny rozmiar, kształt, występować w różnej liczbie na określonej powierzchni, czy też różnić się grubością ścianek. Ich jakość uzależniona jest od wielu czynników, co jest tematem wielu prac badawczych (Hayter i in., 1986; Mezreb i in., 2003; Włodarczyk-Stasiak i Jamroz, 2009; Crowley i in., 2010; Żelazinski, 2011; Bisharat i in., 2013).

Udowodniono, że pory otaczające zewnętrzną część ekstrudatu są spłaszczone, co może być efektem oddziaływania ścianek kanału wylotowego matrycy oraz dużej szybkości wymiany ciepła i masy występującej w warstwie przypowierzchniowej. W miarę zbliżania się do środka ekstrudatu struktura wewnętrzna porów jest zwykle symetryczna, ale ich rozmiar i kształt może się zmieniać (Desrumaux i in., 1998, Ekielski i Żelaziński 2012). Według Lui i Peng (2005) oraz Desrumaux i in. (1998) zmiany porowatości wpływają na cechy teksturalne ekstrudowanych produktów. Lanuay i in. (1983) zauważyli, że porowatość istotnie wpływa również na ocenę sensoryczną - wraz ze wzrostem wielkości porów wzrasta chrupkość produktów. Proces ten nie jest do końca poznany i ciągle budzi zainteresowanie wielu autorów (Desrumaux i In., 1998; Ays,e i in., 2004; Lui i Peng, 2005; Biller i in., 2005; Biller, 2006; Agbisit i in., 2007; Wojtowicz i in., 2010; Żelaziński, 2011).

Charakterystyczna budowa produktów uzyskanych na drodze ekstruzji może mieć zatem istotny wpływ na dalszą obróbkę np. poprzez rozdrobnienie z

including both appropriately selected composition and sensory characteristics. The same shape of such products particles can be also essential. Ultimately, it may be relevant for the breadcrumbs classification for a particular product type. In the literature, there are no tests found on breadcrumbs obtained from the extrudate as yet. In the context of the extrusion process it has been considered the particle size of the material to be extruded with its effects on the physicochemical properties and digestibility of the product (Al-Rabadi et al., 2011; Al-Rabadi et al., 2012).

Therefore, the objective of this study was to investigate the influence of the extrudate fineness degree on the obtained particles' shape and an attempt to link these characteristics with the quality of the extrudate from which they were originated.

## MATERIALS AND METHODS

The material used in the study was the wheat-corn extrudate (20% wheat, 80% maize), produced in the twin-screw co-extruder with a length to screw diameter  $L/d=27$ . At the head of the extruder die was used with a multiple outlet nozzles of 3 mm. Screw rotation speed of 300 rpm, and temperature profiles viewed from extruder's die, were: {130/130/100°C}, {140/140/100°C} and {150/150/100°C} Celsius degrees. The temperature was controlled in the first and second section of the extruder using the PID controller.

Porosity was determined by the method of Gosselin and Rodrigue (2005), using an irregular boundary of the analyzed group of air pores in the analyzed images. The porosity analysis was lead with the use of LabView 7.1 package with vision libraries and Vision Assistant 7.1.1 program, where the images were transposed to the monochrome area and were treated with specialized photo retouch. Then, the obtained images of byte grayscale (256 levels) were converted to divalent bitmaps and appropriate shades of gray thresholds were chosen in the range of 1-255 (threshold).

The resulting extrudates were ground in a hammer grinder with a sieve on the output of 3 mm. This was followed by separation of the particles on the laboratory sieve analyzer: Laboratory siever type LP2E-2e (MULTISERV) according to DIN ISO 3310-1, amplitude of 60, frequency of 2.00 Hz, duration of 10 minutes, sieve sizes: 2.0, 1.6, 1.0, 0.8, 0.5, 0.25, 0.1, <0.05 mm.

Individual breadcrumbs fractions were spread out on black paper, then photographed using a CCD camera KP-FD30 HITACHI in the light chamber, illuminated with fluorescent light TL-D De Luxe Pro 18W/965, with a color temperature of 6500K (Philips) and visual analysis was given using the Visio Assistant 7.1 program. This program allowed for the calculation of coefficients which characterize the particles shape according to the following formulas (1), (2), (3), (4), (5):

przeznaczeniem na panier spożywczy. Obecnie tego typu produktom stawia się szereg wymagań obejmujących zarówno odpowiednio dobrany skład, jak i cechy sensoryczne. Istotny może być również sam kształt cząstek takich produktów, który docelowo może mieć znaczenie przy zakwalifikowaniu panieru do danego typu produktu. W literaturze nie znaleziono jak dotąd badań przeprowadzanych na panierce spożywcym uzyskanym z ekstrudatu. W kontekście procesu ekstruzji rozpatrywano jak dotąd wielkość cząstek materiału poddawanego ekstruzji wraz z jego wpływem na cechy fizykochemiczne i strawność produktu (Al-Rabadi i in., 2011; Al-Rabadi i in., 2012).

Celem pracy było zatem zbadanie wpływu stopnia rozdrobnienia ekstrudatu na kształt uzyskanych cząstek i próba powiązania tych cech z jakością ekstrudatu z którego powstały.

## MATERIAŁ I METODYKA

Materiałem wykorzystywanym w badaniach był ekstrudat pszenno-kukurydziany (20% pszenica, 80% kukurydza), wyprodukowany na współbieżnym ekstruderze dwuślimakowym o stosunku długości do średnicy ślimaków  $L/d=27$ . Na głowicy ekstrudera zastosowano wielootworową matrycę z dyszami wylotowymi 3 mm. Prędkość obrotowa ślimaków wynosiła 300 obr·min<sup>-1</sup>, a profil temperaturowy procesu w cylindrze ekstrudera, patrząc od ekstrudera do matrycy wynosił: {130,/130/100°C}, {140,/140/100°C}, {150,/150/100°C} stopni Celcjusza. Temperaturę utrzymywano w dwóch pierwszych sekcjach ekstrudera utrzymywano za pomocą sterownika PID.

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 Asistant 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).

Wytworzone ekstrudaty rozdrobniono na rozdrabniaczu bijakowym z sitem na wyjściu 3 mm. Następnie przeprowadzono separację cząstek na analizatorze laboratoryjnym: przesiewacz laboratoryjny typ LP2E-2e (Multiserv) wg normy DIN ISO 3310-1, amplituda 60, częstotliwość 2,00 Hz, czas 10 minut, wielkości sit: 2,0; 1,6; 1,0; 0,8; 0,5; 0,25; 0,1; <0,05 mm.

Poszczególne frakcje panieru rozkładano na czarnym papierze, następnie fotografowano za pomocą kamery CCD KP-FD30 firmy HITACHI w komorze bezcieniowej, oświetlonej świetlówkami światła dziennego TL-D De Luxe Pro 18W/965, o temperaturze barwowej 6500K firmy Philips i podawano analizie wizyjnej, wykorzystując program Visio Assistant 7.1. Wspomniany program pozwalał na obliczenie współczynników charakteryzujących kształt cząstek według poniższych wzorów (1), (2), (3), (4):

$$\text{Elongation Factor} = \frac{F}{RF_b} \quad (1)$$

$$\text{Heywood Circularity Factor} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2)$$

Compactness Factor 
$$\frac{A}{W \cdot H} \tag{3}$$

Type factor 
$$\frac{A^2}{4\pi\sqrt{I_{xx} - I_{yy}}} \tag{4}$$

where:

F – Max Feret; RF<sub>b</sub> – Feret (Rect Short Side); P – Perimeter; A – Area of the particle ; W – Bounding Rect Width; H – Bounding Rect Height;

$I_{xx}$  – Moment of Inertia XX 
$$\sum_{xx} \frac{\sum x^2}{A}$$
,

$I_{yy}$  – Moment of Inertia YY 
$$\sum_{yy} \frac{\sum y^2}{A}$$
.

The experiment was planned by the Central Compositional Plan / Design of Experiments (DOE) - the number of input values: 2, number of blocks: 1, number of circuits: 24 with repetition. Different variables were coded as numeric values: -1, 0, 1. Furthermore, the additional repeat was applied at a central point. The plan was created using the Statistica 10, which was then used to obtain a response surface. Variable analysis of significance was performed using analysis of variance ANOVA and statistical evaluation of the fit quality of surface response equations - a coefficient of determination R<sup>2</sup> and mean square error MSE (Mean Square Error).

**RESULTS**

Samples from twin-screw extruder had a uniform structure and visually, despite the use of three extrusion temperature t={130, 140, 150}°C, did not differ significantly from each other. Mounted multi-hole die with a holes diameter of 3mm and a knife cutting device made it possible to produce extrudates in the shape of a cylinder with a diameter of about 4mm and a length of about 6 mm (Fig.1).

gdzie: F – maksymalny rozmiar Fereta; RF<sub>b</sub> – krótszy wymiar prostokątny Fereta; P – Obwód cząsteczki A – Pole rzutu cząstki ; W – szerokość cząstki ; H – długość cząstki;

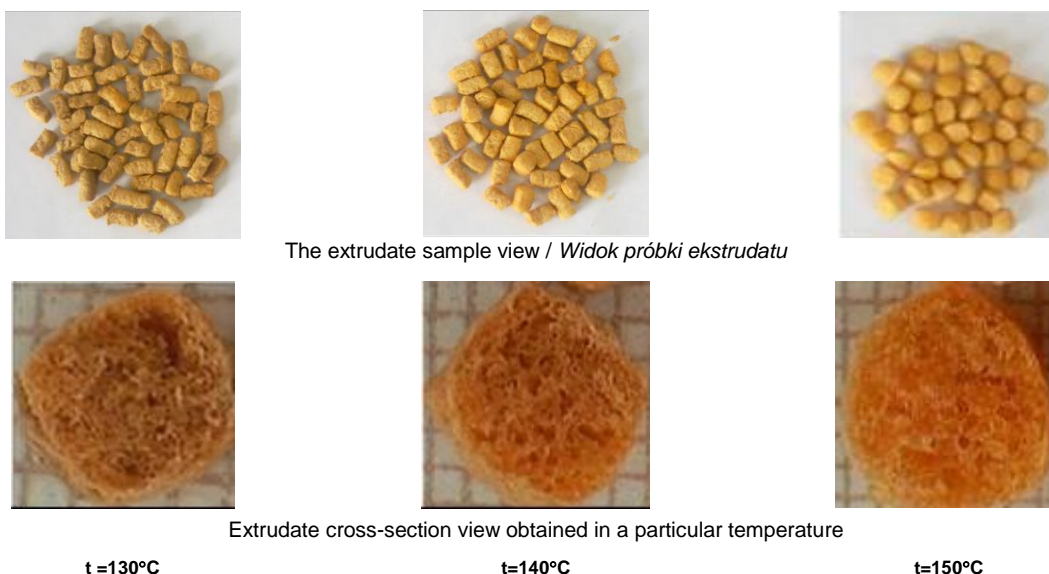
$I_{xx}$  – Moment bezwładności osi xx 
$$\sum_{xx} \frac{\sum x^2}{A}$$
,

$I_{yy}$  – Moment bezwładności osi yy 
$$\sum_{yy} \frac{\sum y^2}{A}$$
.

Eksperyment zaplanowano za pomocą Centralnego Planu Kompozycyjnego (DOE) - liczba wielkości wejściowych: 2, liczba bloków: 1, liczba układów: 24 z powtórzeniem. Poszczególne zmienne zakodowano jako wartości liczbowe: -1, 0, 1. Zastosowano ponadto dodatkowe powtórzenia w punkcie centralnym. Plan utworzono z wykorzystaniem programu Statistica 10, służącego następnie do uzyskania powierzchni odpowiedzi. Analizę istotności zmiennych przeprowadzono za pomocą analizy wariancji ANOVA, a ocenę statystyczną jakości dopasowania równań powierzchni odpowiedzi – za pomocą współczynnika determinacji R<sup>2</sup> oraz błędu średnio kwadratowego MSE (ang. Mean Square Error).

**WYNIKI BADAŃ**

Próbki uzyskane na dwuślimakowym ekstruderze charakteryzowały się jednorodną budową i wizualnie, pomimo zastosowania trzech temperatur procesu ekstruzji t={130, 140, 150}°C, nie różniły się znacząco od siebie. Zamontowana wielootworowa matryca o średnicy otworów 3mm z nożem obcinającym pozwoliła na wytworzenie ekstrudatów w kształcie walca o średnicy około 4mm i długości około 6mm (rys.1).



The extrudate sample view / Widok próbki ekstrudatu

Extrudate cross-section view obtained in a particular temperature

t =130°C

t=140°C

t=150°C

Fig.1 - View of whole-samples and cross-section of the samples obtained under different temperature conditions

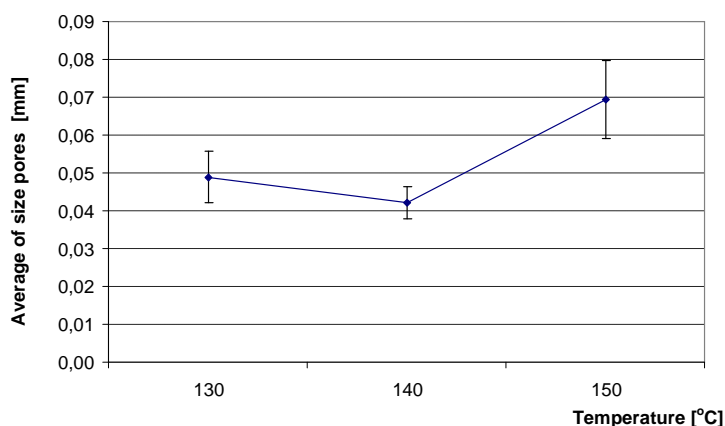


Fig.2 - Effect of extrusion temperature on the average of size of pores designated in cross-section of extrudate

Samples produced under these conditions differed significantly by the construction of the internal structure, which confirmed the results of empirical research. It was found that the samples obtained at the highest temperature (150°C) had the greatest pores, with the average size of about 0.07 mm<sup>2</sup>. The average pore size obtained at 130 and 140°C ranged from 0.042 to 0.051 mm<sup>2</sup> (Fig.2).

The graph (Fig.3) shows the additional parameters determining the porosity of the resulting products, i.e. the number of pores in mm<sup>2</sup> in the extrudate cross-sectional area and the total surface pores, expressed as a percentage of pore surface in relation to the analyzed surface of the extrudate. It was found that the fewest number of pores (2 pores•mm<sup>-2</sup>) was in the extrudate made in a temperature of 150°C, while other samples prepared at lower temperatures contain as low as 4.5 to 5.5 pores in mm<sup>2</sup>. The total area of pores in the analyzed extrudate samples is in the range from about 16% to 24%, as shown in Figure 3.

Wytworzone w tych warunkach próbki różniły się jednak znacząco budową struktury wewnętrznej, co potwierdziły wyniki badań empirycznych. Stwierdzono, że próbki uzyskane w najwyższej temperaturze (150°C) posiadały największe pory, których średnia powierzchnia wynosiła około 0,07 mm<sup>2</sup>. Średni rozmiar porów uzyskanych w temperaturze 130 i 140°C zawierał się w przedziale od 0,042 do 0,051 mm<sup>2</sup> (rys. 2).

Na wykresie (rys. 3) przedstawiono dodatkowe parametry określające porowatość uzyskanych produktów tj. liczbę porów w mm<sup>2</sup> powierzchni przekroju ekstrudatu oraz ogólną powierzchnię porów wyrażoną jako procentowy udział powierzchni porów w stosunku do analizowanej powierzchni ekstrudatu. Stwierdzono, że najmniejszą liczbę porów (2 pory•mm<sup>-2</sup>) posiadał ekstrudat wytworzony w temperaturze 150 °C, podczas gdy pozostałe próbki wytworzone w niższych temperaturach zawierały w mm<sup>2</sup> nawet od 4,5 do 5,5 pora. Ogólna powierzchnia porów w analizowanych próbkach ekstrudatu zawierała się w przedziale średnio od 16% do 24%, co przedstawiono na rysunku 3.

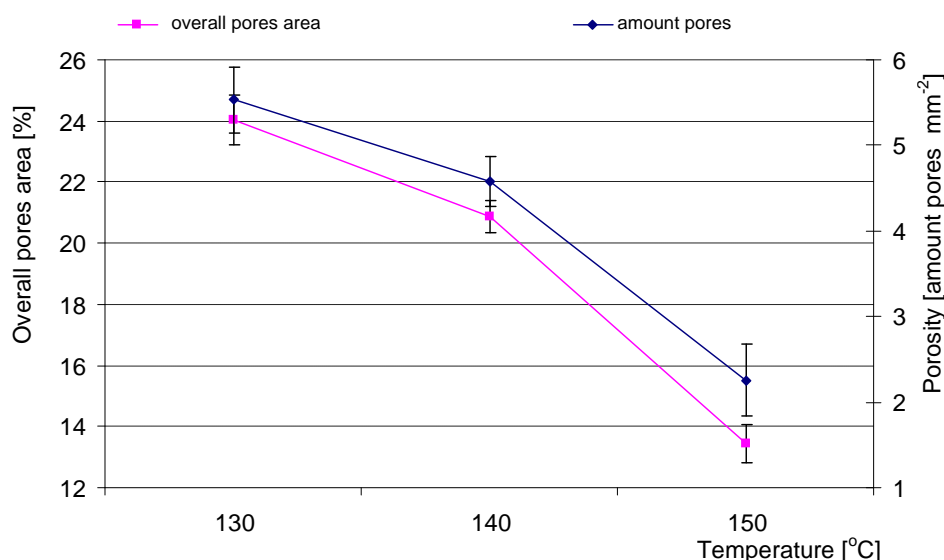


Fig.3 - Effect of extrusion temperature on the overall pores area and the number of pores in the extrudate cross-section

As porosity of the obtained results showed that the individual extrudate samples obtained at different temperatures differed distinctly, one could assume that they behave in different ways when subjected to the action of hammer mill. Therefore, below in Table 1 there are summarized the results of the percentage distribution of the fractions obtained. Based on preliminary

Ponieważ uzyskane wyniki badań porowatości wykazały, że poszczególne próbki ekstrudatu uzyskane przy różnych temperaturach wyraźnie się różniły, można było założyć, że w różny sposób będą się zachowywały po poddaniu ich działaniu rozdrabniacza bijakowego. Dlatego poniżej w tabeli 1. zestawiono wyniki procentowego rozkładu uzyskanych frakcji. Na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że procentowy udział

examination it can be concluded that the percentage fraction of the extrudate varies depending on the sieve used, as well as the extrusion temperature employed.

frakcji ekstrudatu zmienia się w zależności od zastosowanego sita, jak również od zastosowanej temperatury procesu ekstruzji.

Table 1

Percentage of crushed extrudate fractions for different temperature conditions

Sieve mesh size # DIN ISO 3310-1 [mm]	130 °C	140 °C	150 °C
0,05 <	2.33	2.79	0.86
0.1	10.52	17.02	2.32
0.25	15.75	24.34	4.32
0.5	13.05	16.96	8.52
0.8	4.10	5.26	4.88
1.0	23.19	20.53	33.02
1.6	22.54	9.77	36.73
2.0	8.53	3.34	9.36

Additionally, it can be observed that the individual fractions of particulate ground extrudate distinguished not only by fragmentation but also by the shape of the resulting particles. Carry out a preliminary analysis of the image allowed for the characterization of particles shape with the four coefficients of the shape described in the methods. Below, there are some sample images of particulate extrudate samples fraction analyzed (Fig. 4).

Dodatkowo można było zaobserwować, że poszczególne frakcje rozdrobnionego ekstrudatu wyróżniały nie tylko stopniem rozdrobnienia, ale dodatkowo kształtem uzyskanych cząstek. Przeprowadzenie wstępnej analizy obrazu pozwoliło na scharakteryzowanie kształtu uzyskanych cząstek na podstawie czterech współczynników kształtu, opisanych w metodyce pracy. Poniżej przedstawiono wybrane przykładowe zdjęcia frakcji analizowanych próbek rozdrobnionego ekstrudatu (rys. 4).

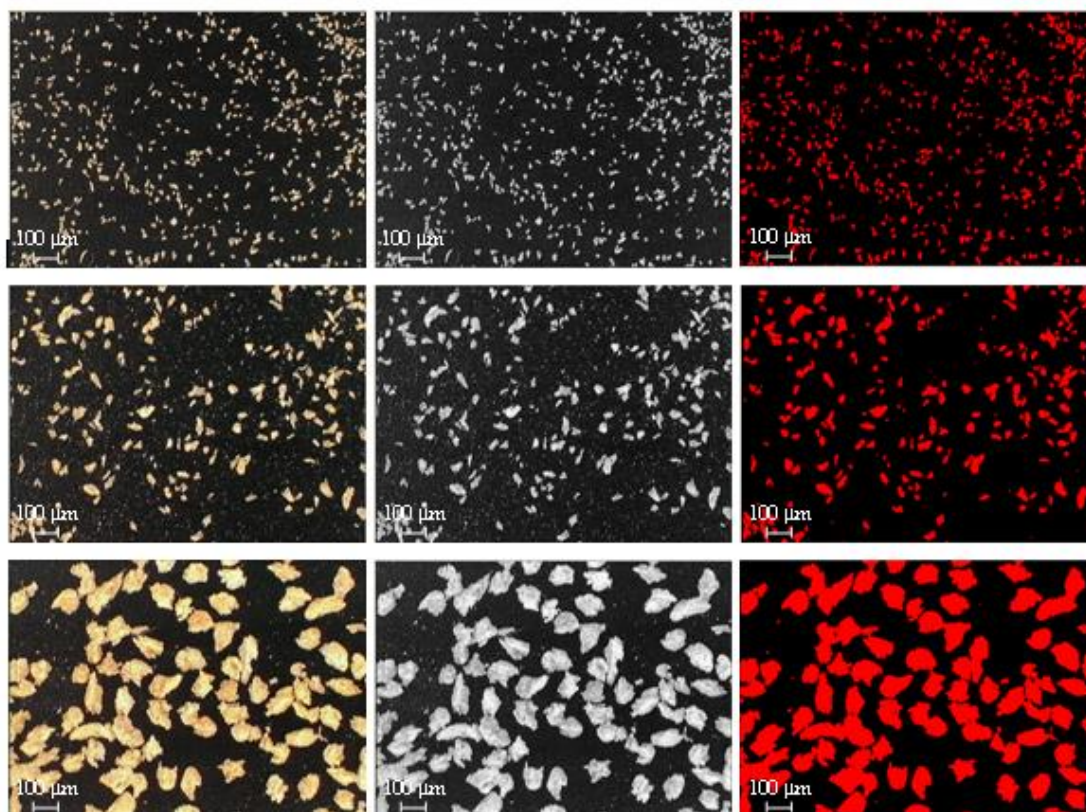


Fig.4 - Example analysis of the ground fraction of the extrudate. a) the fraction of 0.1, b) the fraction of 0.25, c) the fraction of 0.8.

On the basis of the statistical analysis it was found that the only important parameter influencing on the particle shape obtained during experiment is the degree of the extrudate fragmentation, obtained after separation of the ground extrudate to the appropriate fractions. The analysis of variance ANOVA indicated the importance of first and second order factor in analyzing elongation, roundness and compactness factor. In the case of the surface development factor (Type Factor) there were both temperature and fragmentation of the second row significant.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono, że jednym istotnym parametrem mającym wpływ na kształt uzyskanych cząstek jest stopień rozdrobnienia ekstrudatu, uzyskany po rozdzielaniu rozdrobnionego ekstrudatu na odpowiednie frakcje. Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA wskazała na istotność pierwszego i drugiego rzędu przy analizowaniu współczynnika wydłużenia, okrągłości i współczynnika upakowania. W przypadku współczynnika rozwinięcia powierzchni (Type Factor) istotnymi okazały się zarówno temperatura, jak i rozdrobnienie drugiego rzędu.

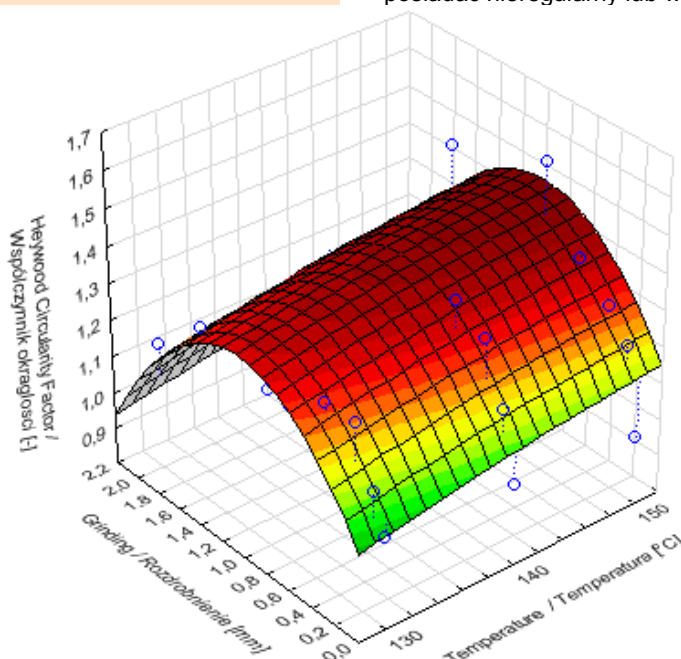
Table 2

Anova table with important factors for  $p < 0.05$ 

	SS	df	MS	F	p
<b>Elongation factor, <math>R^2 = 0.258</math>, MS = 0.008, <math>R^2 = 0.558</math>, MS = 0.008</b>					
Temperature (L)	0.0131	1	0.0131	0.1712	0.6837
Temperature (Q)	0.0531	1	0.0531	0.6963	0.4144
Grinding (L)	0.3654	1	0.3654	4.7881	0.0414
Grinding (Q)	0.0287	1	0.0287	0.3759	0.5471
Error	1.4500	19	0.0763		
Overall SS	1.9542	23			
<b>Roundness factor, <math>R^2 = 0.687</math>, MS = 0.008</b>					
Temperature (L)	0.0348	1	0.0348	4.3298	0.0512
Temperature (Q)	0.0008	1	0.0008	0.1052	0.7493
Grinding (L)	0.0008	1	0.0008	0.0992	0.7562
Grinding (Q)	0.2943	1	0.2943	36.6754	0.0000
Error	0.1525	19	0.0080		
Overall SS	0.4874	23			
<b>Compactness factor, <math>R^2 = 0.584</math>, MS = 0.003</b>					
Temperature (L)	0.0102	1	0.0102	2.9790	0.1006
Temperature (Q)	0.0110	1	0.0110	3.1980	0.0897
Grinding (L)	0.0103	1	0.0103	2.9990	0.0995
Grinding (Q)	0.0523	1	0.0523	15.2418	0.0010
Error	0.0652	19	0.0034		
Overall SS	0.1568	23			
<b>Type factor, <math>R^2 = 0.463</math>, MS = 0.001 / Współczynnik rozwinięcia, <math>R^2 = 0.563</math>, MS = 0,001</b>					
Temperature (L)	0.0051	1	0.0051	3.6954	0.0697
Temperature (Q)	0.0164	1	0.0164	11.8644	0.0027
Grinding (L)	0.0021	1	0.0021	1.5249	0.2319
Grinding (Q)	0.0063	1	0.0063	4.5219	0,0468
Error	0.0263	19	0.0014		
Overall SS	0.0592	23			

The values of the factors as a function of the analyzed fineness (obtained fraction) and the temperature of the extrusion process are shown in the form of three-dimensional response surface plots generated in Statistica 10. It was found that the smallest and largest extrudate fractions were close to unity, so were the most round. In the case of the middle fraction roundness values significantly increased, suggesting that the obtained fractions were less round and may have an irregular or elongated shape (Fig. 5).

Wartości analizowanych współczynników w funkcji rozdrobnienia (uzyskanych frakcji) oraz temperatury procesu ekstruzji przedstawiono w postaci trójwymiarowych wykresów powierzchni odpowiedzi wygenerowanych w programie Statistica 10. Stwierdzono, że najmniejsze i największe frakcje ekstrudatu zbliżone były do jedności, zatem były najbardziej okrągłe. W przypadku frakcji środkowych wartości współczynnika okrągłości wyraźnie wzrastały, co sugeruje, że uzyskane frakcje były mniej okrągłe i mogły posiadać nieregularny lub wydłużony kształt (rys. 5).

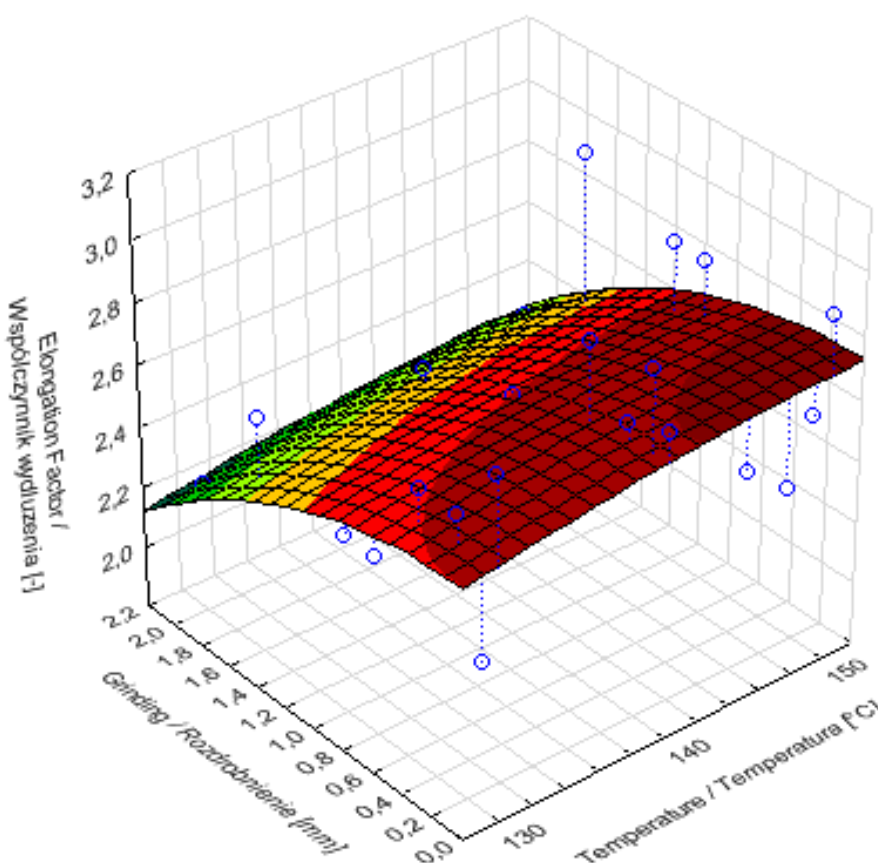


$$z = -1,485 + 0,032 \cdot x - 0,0001 \cdot x^2 + 0,597 \cdot y - 0,292 \cdot y^2$$

Fig. 5 - Effect of extrusion temperature and the degree of extrudate fineness into roundness factor of breadcrumbs particles obtained

Elongation factor (Fig.6) showed an increase in the length of the fraction obtained with the reduction of extrudate particle size. Therefore, the greatest length had the particles retained on a sieves of 0.25, 0.1 and less than 0.05 mm. Extension of the fine particles is due to the fact that their main ingredients are shredded pieces of the pore walls structure. While, in the case of larger particles, the main component are whole extrudate's pore fragments, creating a more rounded structure. This phenomenon can be explained physically - by the presence of pore wall fragments, and chemically - different chemical composition of extrudate fractions - bonds between the plant fibers and grain protein in given particles. The diversity of shape is important because of the sensory evaluation of the products obtained from the consumers. This can be extremely valuable insight for future producers of such products.

Współczynnik wydłużenia (rys.6) wskazywał natomiast na wzrost długości uzyskanych frakcji wraz z zmniejszeniem cząstek ekstrudatu. Największą długość posiadały zatem cząstki zatrzymane na sitach 0,25; 0,1 oraz poniżej 0,05 mm. Wydłużenie drobnych cząstek jest spowodowane tym, że głównym ich składnikiem są rozdrobnione fragmenty struktury ścianek porów. Podczas gdy, w przypadku większych cząstek, głównym ich składnikiem są całe fragmenty porów ekstrudatu, tworząc bardziej obłe struktury. Takie zjawisko można uzasadnić zarówno fizycznie - obecnością fragmentów ścianek por, jak i zróżnicowanym składem chemicznym frakcji ekstrudatu - wiązaniami między włóknami roślinnymi a białkiem zbóż w danych cząstkach. Zróżnicowanie kształtu jest istotne ze względu na ocenę sensoryczną uzyskiwanych produktów przez odbiorców. Może być to niezwykle cenne spostrzeżenie dla przyszłych producentów tego typu produktów.

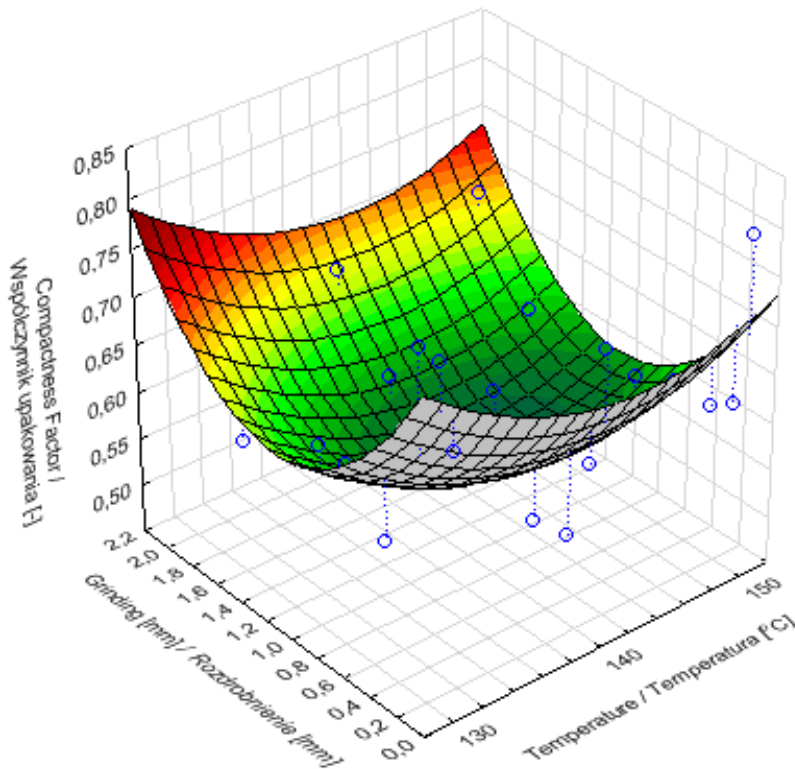


$$z = -1,638 + 0,056 \cdot x - 0,0001 \cdot x^2 + 0,015 \cdot y - 0,106 \cdot y^2$$

Fig. 6 - Effect of extrusion temperature and the degree of extrudate fineness into elongation factor of breadcrumbs particles obtained

Analysis of compactness factor showed that this parameter varies inversely than a roundness factor (Fig. 7). It was found that the lowest value of this ratio ranged from 0.5 to 0.6, indicating that the particles of such form in the slightest degree fill a rectangular boundary included in the calculated dependence (formula 3).

Analiza współczynnika upakowania (compactness factor) wykazała, że parametr ten zmienia się odwrotnie niż współczynnik okrągłości (rys. 7). Stwierdzono, że najmniejsze wartości tego współczynnika zawierały się w przedziale 0,5-0,6, co świadczy, że cząstki o takim kształcie w najmniejszym stopniu wypełniają obwiednię prostokątną uwzględnioną w obliczanej zależności (wzór 3).

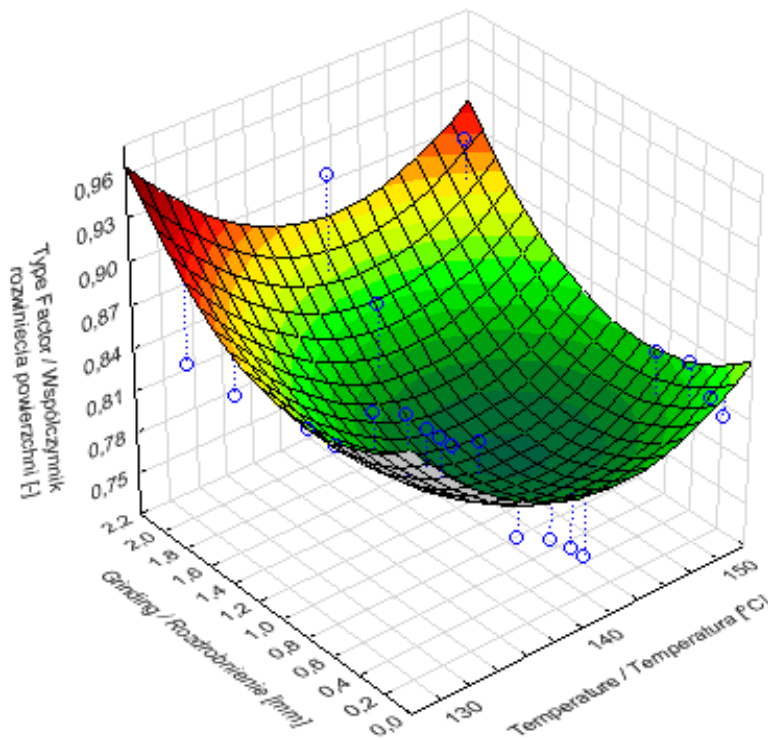


$$z = 9,697 + 0,0126 \cdot x + 0,0004 \cdot x^2 - 0,287 \cdot y + 0,129 \cdot y^2$$

Fig. 7 - Effect of extrusion temperature and the degree of extrudate fineness into compactness factor of breadcrumbs particles obtained

Graph showing the type factor (Fig.8) as a function of temperature and fineness have a course close to the compactness factor.

Wykres przedstawiający współczynnik rozwinięcia powierzchni Type Factor (rys. 8) w funkcji rozdrobnienia i temperatury posiadał przebieg zbliżony do współczynnika upakowania (Compactness Factor).



$$z = 9,789 - 0,126 \cdot x + 0,0004 \cdot x^2 - 0,0812 \cdot y + 0,05 \cdot y^2$$

Fig. 8 - Effect of extrusion temperature and the degree of extrudate fineness into type factor of breadcrumbs particles obtained



## CONCLUSIONS

Extrudates obtained in the twin-screw extruder at different temperatures of the process have distinguished by a variable internal structure, which may have an impact on obtaining extrudate fraction with different percentage of the particles and the shape of the extrudate particles after their fragmentation.

Analyzed shape ratios are clearly different depending on the obtained sieved extrudate fractions. This may have a technological importance in the case of each fraction destination for selected food products. Such a relationship can be very useful in, for example, the design of breadcrumbs extrudates production lines intended for different products.

Further research requires the link between the chemical composition, sensory analysis with the shape and size of the particles of obtained breadcrumbs.

## REFERENCES

- [1]. 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, pp.199-219;
- [2]. Al-Rabadia G. J., Torleyb P. J., Williamsa B. A., Bryden W. L., Gidleya M. J. (2011) – *Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates*. Animal Feed Science and Technology, 168, pp.267-279;
- [3]. Al-Rabadia G. J., Torleyb P. J., Williamsa B. A., Bryden W. L., Gidleya M. J. (2012) – *Particle size heterogeneity in milled barley and sorghum grains: Effects on physico-chemical properties and starch digestibility*. Journal of Cereal Science, 56, pp.396-403;
- [4]. Biller E. (2006) – *Dynamics of color changes during thermal processing of wheat bread, depending on the time of dough kneading*. Agriculture Engineering, 7(82), pp.43-50;
- [5]. Biller E., Ekielski A. (2005) – *Modeling of wheat bread texture using the index of surface color changes dynamics during thermal processing*. Agriculture Engineering, 10(70), pp.23-31;
- [6]. Bisharat G.I., Oikonomopoulou V.P., Panagiotou N.M., Krokida M. K., Maroulis Z. B. (2013) – *Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables*. Food Research International, 53, pp.1-14;
- [7]. Chuang G. C.-C., Yeh A.-I. (2004) – *Effect of screw profile on residence time distribution and starch gelatinization of rice flour during single screw extrusion cooking*. Journal of Food Engineering, 63 (6), 21–31;
- [8]. 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), pp.370-375;
- [9]. 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), pp.857-863;
- [10]. Ding Q.B., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G., Marson H. (2006) – *The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks*. Journal of Food Engineering, 73 (2), pp.142–148;
- [11]. Ekielski A. (2011) – *Effect of selected parameters of double-screw extruder operation on fractal dimensions of the extrudate*. Annals of Warsaw University of Life

## WNIOSKI

Ekstrudaty uzyskane na ekstruderze dwuślimakowym w różnych temperaturach procesu wyróżniała zmienna struktura wewnętrzna, co mogło mieć wpływ na uzyskanie frakcji ekstrudatu o różnym procentowym udziale oraz kształcie cząstek ekstrudatu po ich rozdrobieniu.

Analizowane współczynniki kształtu wyraźnie różnią się w zależności od uzyskanej przesiewanej frakcji ekstrudatu. Może mieć to znaczenie technologiczne w przypadku przeznaczenia poszczególnych frakcji dla wybranych produktów żywnościowych. Taka zależność może być bardzo przydatna w przypadku np. projektowania linii technologicznych produkcji panieru ekstrudowanego z przeznaczeniem dla różnych produktów.

Dalszych badań wymaga również powiązanie składu chemicznego, analizy sensorycznej z kształtem i wielkością cząstek otrzymanego panieru.

## LITERATURA

- [1]. Agbisit R., Alavi S., Cheng E., Herald T., Trater A. (2007) – *Związki między mikrostrukturą i właściwościami mechanicznymi ekstrudatów z komórkowej skrobi kukurydzianej*. Journal of Texture Studies, 38, 199-219;
- [2]. Al-Rabadia G. J., Torleyb P. J., Williamsa B. A., Bryden W. L., Gidleya M. J. (2011) – *Wpływ temperatury procesu ekstruzji i wielkością cząstek materiału przed ekstruzją na kinetykę rozkładu skrobi w ekstrudacie z jęczmienia i sorgo*. Animal Feed Science and Technology, 168, 267-279;
- [3]. Al-Rabadia G. J., Torleyb P. J., Williamsa B. A., Bryden W. L., Gidleya M. J. (2012) – *Zróżnicowanie wielkości cząstek mielonego jęczmienia i ziarna sorgo: Wpływ na właściwości fizyko-chemiczne i strawność skrobi*. Journal of Cereal Science, 56, 396-403;
- [4]. Biller E. (2006) – *Dynamika zmian barwy podczas obróbki termicznej pieczywa pszennego w zależności od czasu mieszenia ciasta*. Inżynieria Rolnicza, 7(82), 43-50;
- [5]. Biller 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;
- [6]. Bisharat G.I., Oikonomopoulou V.P., Panagiotou N.M., Krokida M. K., Maroulis Z. B. (2013) – *Wpływ warunków wyłaczania na właściwości strukturalne ekstrudatów z kukurydzy wzbogaconych suszonymi warzywami*. Food Research International, 53, 1-14;
- [7]. Chuang G. C.-C., Yeh A.I. (2004) – *Wpływ profilu ślimaka ekstrudera na rozkład czasu przebywania i żelowania skrobi z mąki ryżowej podczas ekstruzji w ekstruderze jednoślimakowym*. Journal of Food Engineering, 63 (6), 21–31;
- [8]. Crowley P., Grau H., Arendt E. K. (2000) – *Wpływ dodatków i czasu mieszania na charakterystykę miększu chleba pszennego*. Cereal Chemistry, 77(3), 370-375;
- [9]. Desrumaux A., Bouvier J. M., Burri J. (1998) – *Wpływ wielkości cząstek kaszy kukurydzianej i ich dystrybucji na cechy fizyczne ekspandowanych ekstrudatów*. Journal of Food Science Engineering Processing, 63 (5), 857-863;
- [10]. Ding Q.B., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G., Marson H. (2006) – *Wpływ warunków procesu ekstruzji na funkcjonalne i fizyczne właściwości ekspandowanych przekąsek pszenicznych*. Journal of Food Engineering, 73(2), 142–148;
- [11]. Ekielski A. (2011) – *Wpływ wybranych parametrów pracy dwuślimakowego ekstrudera na fraktalne wymiary ekstrudatu*. Annals of Warsaw University of Life

Sciences-SGGW, 57, pp.41-47;

[12]. 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), pp.57-61;

[13]. Emir Ays\_e O`zer • S\_enol l`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, pp.474-479;

[14]. Girish M., Ganjyal G. M., Milford A., Hanna M. A. (2004) – *Effect of extruder die nozzle dimension on expansion and micrographic characterization during extrusion of acetylated starch*. Starch, 56, pp.108-117;

[15]. Girish M., Ganjyal G. M., Milford A., Hanna M. A. (2006) – *Digital image processing for measurement of residence time distribution in a laboratory extruder*. Journal of Food Engineering, 75 (2), pp.237-244;

[16]. Gosselin R., Rodrigue D. (2005) – *Cell morphology analysis of density polymer foams*. Polymer Testing, 24, pp.1027-1035;

[17]. Hayter A. L., Smith A. C., Richmond P. (1986) – *The physical properties of extruded food foams*, Journal of Materials Science, 21 (10), pp.3729-3736;

[18]. Lanuay B., Lisch J. M. (1983) – *Twin-screw extrusion cooking of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates*. Journal of Food Engineering, 9 (2), pp.259-280;

[19]. 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), pp.171-182;

[20]. Mezreb K., Goullieu A., Ralainirina R., Queneudec M. (2003) - *Application of image analysis to measure screw speed influence on physical properties of corn and wheat extrudates*. Journal of Food Engineering, 57, pp.145-152;

[21]. Mościcki L., Mitrus M., Wójtowicz A. (2007) - *Extrusion technique in food industry*. PWRiL, Warszawa;

[22]. PN-ISO 6564:1999 – *Sensory analysis - Methodology - Methods of flavor profiling*;

[23]. Robin F., Engmann J., Pineau N., Chanvrier H., Bovet N., Della Valle G. (2010) – *Extrusion, structure and mechanical properties of complex starch foams*. Journal of Food Engineering, (98), pp.19-27;

[24]. 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, pp.15-32;

[25]. Włodarczyk-Stasiak M., Jamroz J. (2009) – *Specific surface area and porosity of starch extrudates determined from nitrogen adsorption data*. Journal of Food Engineering, 93, pp.379-385;

[26]. Wójtowicz A., Mościcki L., Mitrus M., Oniszczyk T. (2010) – *Effect of plasticizing system configuration on selected properties of extruded whole-grain pasta*. Agriculture Engineering, 4(122), pp.291-297;

[27]. Żelaziński T. (2010) – *Research of extrusion process involving mixtures of buckwheat and corn*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 546, pp.375-381;

[28]. Żelazinski 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;

[29]. Żelazinski T., Ekielski A. (2012) – *Sensory analysis of corn-buckwheat extrudates*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1, pp.50-54.

Sciences-SGGW, 57, 41-47;

[12]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T. (2007) – *Wpływ warunków procesu ekstruzji na właściwości fizyczne ekstrudatu z mieszanki gryka-kukurydza*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 57-61;

[13]. Emir Ays\_e O`zer • S\_enol l`banog`lu • Paul Ainsworth, Cahide Yag`mur. (2004) – *Charakterystyka ekspansji odżywczych ekstrudowanych przekąsek z użyciem metody powierzchni odpowiedzi*. European Food Research and Technology, 218, 5, 474-479;

[14]. Girish M., Ganjyal G. M., Milford A., Hanna M. A. (2004) – *Wpływ wymiaru dyszy wylotowej wytłaczarki na ekspansję i mikrograficzną charakterystykę podczas ekstruzji skrobi acetylowanej*. Starch, 56, 108-117;

[15]. Girish M., Ganjyal G. M., Milford A., Hanna M. A. (2006) – *Cyfrowe przetwarzanie obrazu do pomiarów rozkładu czasu przebywania w laboratoryjnym ekstruderze*. Journal of Food Engineering, 75 (2), 237-244;

[16]. Gosselin R., Rodrigue D. (2005) – *Analiza morfologiczna komórek gęstych pianek polimerowych*. Polymer Testing, 24, 1027-1035;

[17]. Hayter A. L., Smith A. C., Richmond P. (1986) – *Właściwości fizyczne ekstrudowanych pianek spożywczych*, Journal of Materials Science, 21 (10), 3729-3736;

[18]. Lanuay B., Lisch J. M. (1983) – *Dwuślimakowa ekstruzja past skrobiowych, ekspansja i właściwości mechaniczne ekstrudatu*. Journal of Food Engineering, 9 (2), 259-280;

[19]. Lui W.-B., Peng J. (2005) – *Wpływ warunków pracy na degradowalną gąbczastą strukturę komórkową ekstrudatów i ciepło właściwe*. Journal of Food Engineering, 70 (2), 171-182;

[20]. Mezreb K., Goullieu A., Ralainirina R., Queneudec M. (2003) - *Zastosowanie analizy obrazu do pomiaru wpływu prędkości ślimaka na właściwości fizyczne kukurydzianych i pszenicznych ekstrudatów*. Journal of Food Engineering, 57, 145-152;

[21]. Mościcki L., Mitrus M., Wójtowicz A. (2007) - *Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym*. PWRiL, Warszawa;

[22]. PN-ISO 6564:1999; *Analiza sensoryczna – Metodologia – Metody profilowania smakowości*;

[23]. Robin F., Engmann J., Pineau N., Chanvrier H., Bovet N., Della Valle G. (2010) – *Ekstruzja, struktura i właściwości mechaniczne złożonych skrobiowych pianek*. Journal of Food Engineering, (98), 19-27;

[24]. Singh N., Smith A.C. (1997) – *Porównanie skrobi pszennej. Mąka pełnoziarnista i mąka owsiana w procesie ekstruzji*. Journal of Food Engineering, 34, 15-32;

[25]. Włodarczyk-Stasiak M., Jamroz J. (2009) – *Powierzchnia właściwa i porowatość ekstrudatów skrobiowych wyznaczona na podstawie adsorpcji azotu*. Journal of Food Engineering, 93, 379-385;

[26]. 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;

[27]. Żelaziński T. (2010) – *Badania procesu ekstruzji mieszanek z udziałem gryki i kukurydzy*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 546, 375-381;

[28]. Żelazinski T. (2011) – *Badanie porowatości ekstrudatów w zależności od zawartości gryki w mieszance*. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, 57, 49-55;

[29]. Żelazinski T., Ekielski A. (2012) – *Badania sensoryczne ekstrudatów kukurydziano-gryczanych*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1, 50-54.