

## WPLYW ROZWINIĘCIA POWIERZCHNI EKSTRUDATU NA DYNAMIKĘ SORPCJI WODY W RÓŻNYCH WARUNKACH PRZECHOWYWANIA

*Adam Ekielski, Małgorzata Powałka, Tomasz Żelaziński*

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

**Streszczenie.** W badaniach przedstawiono zmiany dynamiki wchłaniania wody przez ekstrudaty zbożowe w zmiennych warunkach klimatycznych. Badano próbki ekstrudatu kukurydzianego, wytworzonego na ekstruderze jednoślismakowym. Uzyskane próbki przechowywano w komorze klimatycznej, w zmiennych warunkach temperatury, wilgotności względnej powietrza oraz czasu przechowywania. Do określenia rozwinięcia powierzchni próbki wykorzystano system analizy obrazu, w którym wyznaczano współczynnik normalizujący  $R_{AE}$ . Badania przeprowadzono dla trzech poziomów rozwinięcia powierzchni próbki oraz trzech zakresów wilgotności, temperatury i czasu przebywania w komorze klimatycznej. Poszczególne poziomy zmiennych zakodowano jako wartości liczbowe -1,0,1 i poddano analizie wariancji ANOVA. Zaobserwowano istotny wpływ rozwinięcia powierzchni ekstrudatu na szybkość przechodzenia próbki w stan obniżonej sorpcji.

**Słowa kluczowe:** ekstruzja, analiza obrazu, sorpcja wody, rozwinięcie powierzchni

### Wprowadzenie

Jedną z zalet produktów spożywczych, otrzymywanych w technologii ekstruzji, jest możliwość uzyskania, wyrobów o wysokich walorach odżywczych i łatwych do przechowywania (Ekielski i in., 2007; Wojtowicz i Mościcki, 2009; Mościcki i in., 2007). Zastosowanie technologii ekstruzji jest coraz bardziej popularne i uzasadnione, biorąc pod uwagę fakt, że duża część odbiorców żywności, coraz częściej zwraca uwagę na zawarte w niej środki konserwujące. Dlatego na rynku pojawiła się znaczna grupa towarów wytwarzanych bez dodatku tych składników. Istotnym w tych produktach jest utrzymanie niskiego poziomu wody aktywnej (Janowicz i in., 2007). Ekstrudaty z racji porowatości i znacznego rozwinięcia powierzchni cechują się dużą higroskopijnością (Cheyen i in., 2004). Zwykle zabezpieczenie w postaci opakowania wystarcza do zapewnienia ochrony produktu przed wzrostem wilgotności. Otwarcie opakowania i wystawienie ekstrudatu bezpośrednio na działanie czynników, takich jak wysoka wilgotność i temperatura, może powodować szyb-

ką zmianę wilgotności produktu, pozbawiając go akceptowalnych cech sensorycznych (Biller, 2006; Ekielski i in., 2005; Galus i Lenart, 2011) i zwiększając ryzyko pojawienia się grzybów i bakterii na jego powierzchni (Marzec i Lewicki, 2004).

Sorpcja pary wodnej zależy od składu i budowy wewnętrznej ekstrudatu, ale również od pola powierzchni kontaktu z otoczeniem (Sokołowska i in., 2008; Kulchan i in., 2010). Techniki oceny stosowane do obliczenia pola powierzchni produktów o zróżnicowanym kształcie wykorzystują sorpcję gazów lub pary, która jest proporcjonalna do wyznaczonego pola powierzchni i właściwości materiału, z którego została wykonana powierzchnia.

Opracowanie modelu zmian dynamiki wchłaniania wody może pozwolić na opracowanie modelu obliczeń czasu przydatności produktu do spożycia w zmiennych warunkach klimatycznych. W pracy zaproponowano metodę obliczenia zdolności wchłaniania wody wyznaczoną w zależności od parametrów środowiska i rozwinięcia linii przekroju poprzecznego ekstrudowanych próbek.

Celem pracy było zbadanie wpływ rozwinięcia powierzchni bocznej ekstrudatów kukurydzianych na ich zdolność do pochłaniania wody w czasie przechowywania w warunkach zmiennej wilgotności i temperatury.

## Metodyka badań

Materiałem badawczym był ekstrudat uzyskany z kaszki kukurydzianej, zakupionej w firmie Silesian Grain (wilgotność kaszki ok. 13,2%, tłuszcz całkowity 0,7%, białko całkowite ok. 8,3%, skrobia ok. 75%), wytworzony w jednoślismakowym ekstruderze KZM-2, L/D=6,5. Surowiec był nawilżany do wilgotności 18% i podawany do ekstrudera w ilości 50 kg/h przez podajnik ślimakowy o regulowanej prędkości obrotowej. Ekstrudat wytłaczany był przez otwór o przekroju kołowym o średnicy  $d=5$  mm. Prędkość obrotową obcinarki ustawiono tak, aby długość otrzymywanych próbek wynosiła około 4 cm. Stabilność przebiegu procesu uzyskano przy prędkości obrotowej ślimaka  $n=200$  obr  $\cdot$  min<sup>-1</sup> i temperaturze głowicy 125°C. Próbkę ekstrudatu suszono do uzyskania wilgotności 8% w suszarce komorowej w temperaturze 104°C i ważono na wadze laboratoryjnej RAD-WAG WPS 600/C z dokładnością odczytu 0.001 g.

Eksperyment polegał na poddaniu próbek działaniu trzech czynników: temperatury ( $T_e$ ), wilgotności względnej ( $R_{He}$ ) i czasu oddziaływania powyższych warunków ( $t_e$ ). Szczegółowe parametry doświadczenia zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

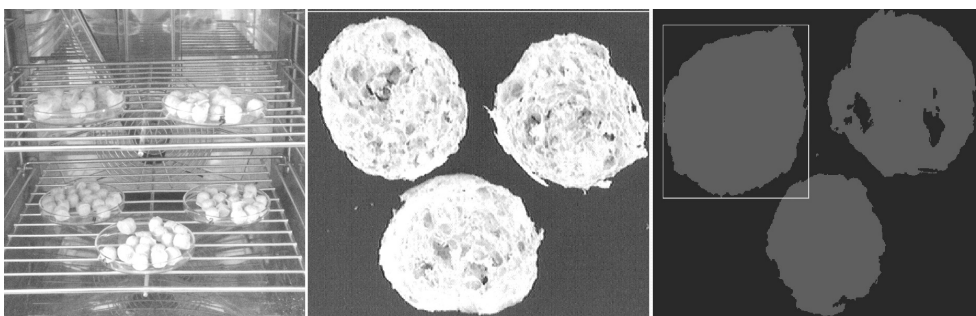
Parametry doświadczenia

Table 1

Parameters of the experiment

Temperatura (°C)	Wilgotność względna (%)	Czas przebywania w komorze (godz.)	Współczynnik rozwinięcia powierzchni (-)
25	40	1	Powierzchnia gładka $R_{AE} = 1,07 - 1,10$
30	60	10	Powierzchnia średnia $R_{AE} = 1,12 - 1,15$
35	80	24	Powierzchnia chropowata $R_{AE} = 1,18 - 1,33$

Zmiany masy próbek na skutek wchłaniania wilgoci z powietrza pozwoliły na wyznaczenie procentowej sorpcji ( $S_E$ ). Do badań wykorzystano komorę klimatyczną typu KBK-30W (rys. 1), wyposażoną w półprzewodnikowe elementy Peltiera oraz wentylator (ich zadaniem było wymuszenie nastawionej temperatury w komorze i uzyskanie temperatur mniejszych od temperatury otoczenia), a także moduł głowicy ultradźwiękowej i moduł zamrażarki do wytwarzania pary wodnej.



Rysunek 1. Widok próbki ekstrudatu kukurydzianego w komorze roboczej oraz próbek przygotowanych do obliczenia współczynnika  $R_{AE}$

Figure 1. View of the maize extrudate sample in the working chamber and the samples prepared for calculating  $R_{AE}$  coefficient

Zważone próbki suszono w temperaturze pokojowej przez okres 24 godz., a następnie przecinano na trzy części, dzieląc je na długości 1/3 i 2/3 całkowitej długości próbki. Tak otrzymane powierzchnie przekroju fotografowano za pomocą kamery CCD KP – FD30 firmy HITACHI w komorze bezciśnieniowej, oświetlonej świetlówkami światła dziennego TL – D De Luxe Pro 18W/965, o temperaturze barwowej 6500 K firmy Philips, i podawano analizie wizyjnej, wykorzystując program Visio Assistant 7.1. Wspomniany program miał możliwość obliczenia współczynnika rozwinięcia powierzchni  $R_{AE}$ , w tym wypadku powierzchni kołowej według poniższych wzorów (1, 2, 3, 4, 5).

$$R_{AE} = \frac{Op}{Ok} \quad (1)$$

gdzie:

- $Op$  – zmierzony obwód przekroju ekstrudatu,
- $Ok$  – obwód okręgu o tym samym polu powierzchni, co pole powierzchni badanej próbki.

Wobec tego promień okręgu wynosił:

$$R = \sqrt{\frac{A_E}{\pi}} \quad (2)$$

$A_E$  – obwód okręgu:

$$Ok = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{A_E}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A_E} \quad (3)$$

$$R_{AE} = \frac{Op}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A_E}} \quad (4)$$

Wyniki pomiarów rozwinięcia powierzchni dla każdej próbek zostały uśrednione wg wzoru:

$$\bar{R}_{AE} = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 R_{AEi}\right)}{3} \quad (5)$$

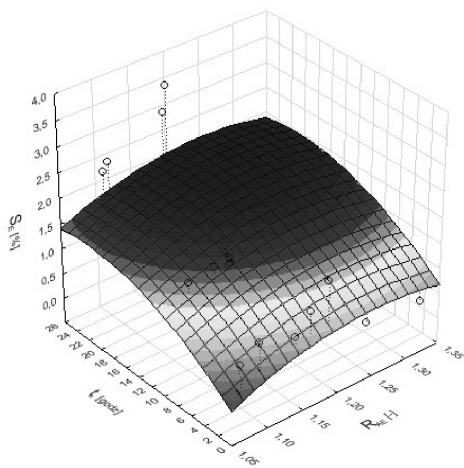
Uzyskane wartości współczynnika rozwinięcia powierzchni ekstrudatu  $\bar{R}_{AE}$  zostały wprowadzone do doświadczenia razem z wielkościami niezależnymi:  $R_{He}$ ,  $t_e$  oraz  $T_e$ . Eksperymenty zostały przeprowadzone w przypadkowej kolejności, aby zminimalizować wpływ niejednoznacznego wpływu kolejnych pomiarów.

Do projektowania eksperymentu wykorzystano Centralny Plan Kompozycyjny (CPK) o liczbie wielkości wejściowych 4, liczbie bloków 1 i liczbie układów 26 + 3 układy w centrum. Poszczególne poziomy zmiennych zakodowano do wartości liczbowych jako wartości -1,0,1. W planie zastosowano środkowe punkty gwiazdne. Plan wygenerowano przy wykorzystaniu programu Statistica 10, który dalej posłużył do uzyskania powierzchni odpowiedzi. Do analizy istotności zmiennych zastosowano analizę wariancji ANOVA.

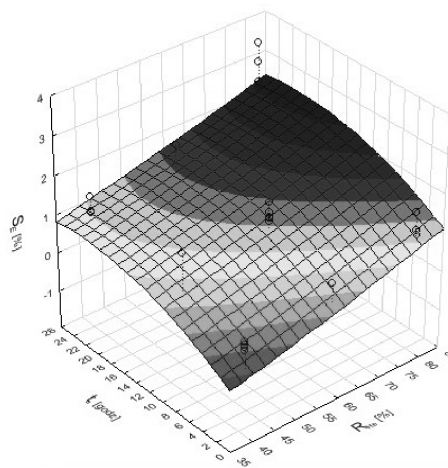
## Wyniki badań

Na podstawie wygenerowanego planu badań obliczono równania powierzchni odpowiedzi o współczynniku determinacji  $R^2 = 0,831$  i błędzie średnio kwadratowym  $MSE = 0,143$ . Powstałe w ten sposób powierzchnie odpowiedzi pozwoliły na dokładną analizę zjawiska sorpcji wilgoci z powietrza przez ekstrudowane produkty.

Na poniższych wykresach przedstawiono zmiany dynamiki sorpcji wilgoci przez ekstrudat kukurydziany w zmiennych warunkach temperaturowych i wilgotnościowych. Stwierdzono, że ekstrudaty posiadające zróżnicowaną powierzchnię pofałdowania charakteryzowały się różnymi właściwościami sorpcyjnymi (rys. 2). Największą zdolnością wchłaniania wilgoci z powietrza charakteryzowały się ekstrudaty o największym stopniu pofałdowania powierzchni z przedziału współczynnika  $R_{AE}=1,18-1,33$ . Ekstrudaty gładkie, o równomiernej strukturze ( $R_{AE}=1,07-1,10$ ), w podobnych warunkach klimatycznych wchłaniały wilgoć w mniejszym stopniu. Zmiany sorpcji wilgoci obserwowano w całym przedziale czasowym zakładanego doświadczenia.



$$S_E = 23,658 + 0,12 \cdot t_e - 0,003 \cdot t_e^2 + 40,066 \cdot R_{AE} - 16,027 \cdot R_{AE}^2 - 0,554$$



$$S_E = 23,658 + 0,120 \cdot t_e - 0,003 \cdot t_e^2 + 0,019 \cdot R_{He} + 0,0001 \cdot R_{He}^2 + 22,466$$

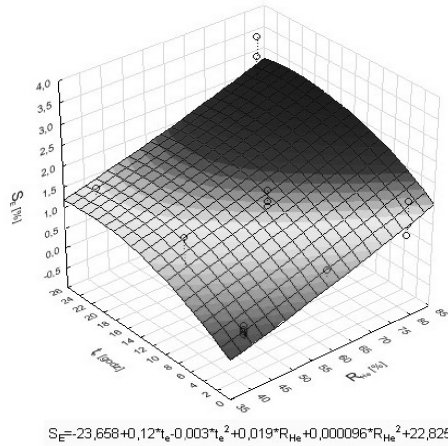
Rysunek 2. Wpływ rozwinięcia powierzchni i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (wilgotność powietrza 60%, temperatura 30°C)

Figure 2. The effect of surface development and sorption time on the sorption properties of the extrudates at humidity of 60% and temperature 30°C

Rysunek 3. Wpływ wilgotności powietrza i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (temperatura 30°C,  $R_{AE} = 1,07$ )

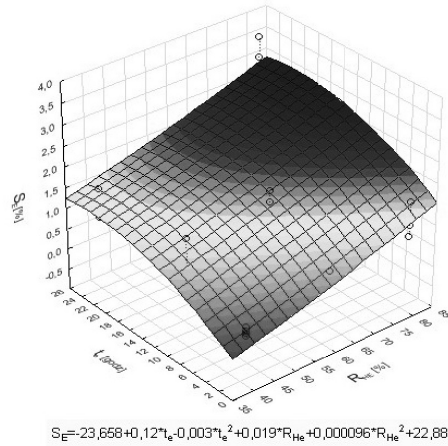
Figure 3. The effect of humidity and storage time on the sorption properties of the extrudates (30°C,  $R_{AE} = 1,07$ )

Istotnym czynnikiem decydującym o wielkości sorpcji wilgoci była zarówno wilgotność powietrza jak i czas przechowywania próbek w komorze klimatycznej. Na wykresach (rys. 3, 4, 5) można zaobserwować, że w warunkach wilgotności powietrza  $R_{He} = 80\%$ , wraz ze wzrostem czasu przebywania próbek w komorze obserwowano najbardziej dynamiczny wzrost sorpcji wilgoci. W tych warunkach, po osiągnięciu zakładanego czasu  $t_e = 24$  godzin, próbki osiągały również największą wartość sorpcji, która dalej wzrastała. W tym przypadku mogło to świadczyć, że próbki nie zostały w pełni nasycone wilgocią. Takie zachowanie ekstrudatu obserwowano przy wszystkich analizowanych powierzchniach ekstrudatu. Przy najniższej zakładanej wilgotności powietrza  $R_{He} = 40\%$ , zmiany te były mniej intensywne, a próbki już po około  $t_e = 10$  godzinach przebywania w komorze wykazywały mniejszą zdolność do absorbowania wilgoci. Można stwierdzić, że próbki po tym czasie stabilizowały się, o czym może świadczyć niewielkie przegięcie powierzchni wykresów w dół po osiągnięciu czasu ekspozycji próbek  $t_e > 10$  godzin (rys. 3, 4, 5). Takie zachowanie mogło być z kolei spowodowane ograniczeniem w przepływie wilgoci w wyniku deformacji ścian tworzących pory wewnątrz ekstrudatu.



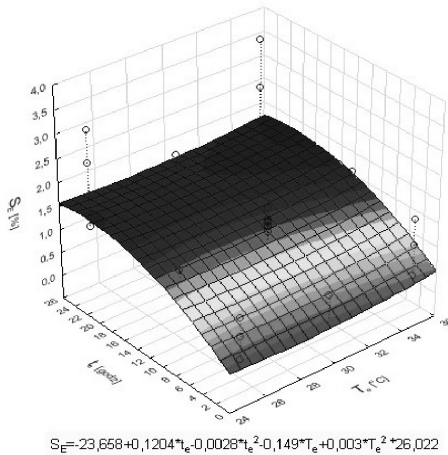
$$S_E = -23,658 + 0,12 \cdot t_e - 0,003 \cdot t_e^2 + 0,019 \cdot R_{He} + 0,000096 \cdot R_{He}^2 + 22,825$$

Rysunek 4. Wpływ wilgotności powietrza i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (temperatura 30°C,  $R_{AE} - 1,15$ )  
 Figure 4. The effect of air humidity and storage time on the sorption properties of the extrudates (30°C,  $R_{AE} - 1.15$ )



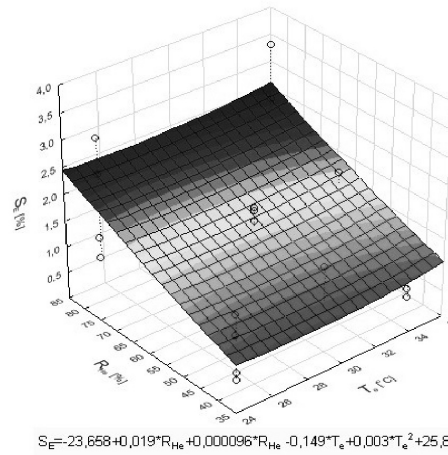
$$S_E = -23,658 + 0,12 \cdot t_e - 0,003 \cdot t_e^2 + 0,019 \cdot R_{He} + 0,000096 \cdot R_{He}^2 + 22,882$$

Rysunek 5. Wpływ wilgotności powietrza i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (temperatura 30°C,  $R_{AE} - 1,33$ )  
 Figure 5. The effect of air humidity and storage time on the sorption properties of the extrudates (30°C,  $R_{AE} - 1.33$ )



$$S_E = -23,658 + 0,1204 \cdot t_e - 0,0026 \cdot t_e^2 - 0,149 \cdot T_e + 0,003 \cdot T_e^2 + 26,022$$

Rysunek 6. Wpływ temperatury i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (wilgotność 60%,  $R_{AE} - 1,07$ )  
 Figure 6. The effect of air temperature and storage time on the sorption properties of the extrudates (humidity 60%,  $R_{AE} - 1.07$ )



$$S_E = -23,658 + 0,019 \cdot R_{He} + 0,000096 \cdot R_{He} - 0,149 \cdot T_e + 0,003 \cdot T_e^2 + 25,801$$

Rysunek 7. Wpływ temperatury i czasu na właściwości sorpcyjne ekstrudatów (czas 10 godz.,  $R_{AE} - 1,33$ )  
 Figure 7. The effect of temperature and storage time on the sorption properties of the extrudates (time 10 h.,  $R_{AE} - 1.33$ )

Na rysunku 6 przedstawiono powierzchnie odpowiedzi zmian sorpcji w funkcji temperatury i czasu przebywania ekstrudatu w komorze przy wilgotności  $R_{He} = 60\%$ . Podobnie jak na wykresach (rys. 3, 4, 5) widać wpływ czasu przebywania na zmiany sorpcji wilgoci. Przy zadanej wilgotności  $R_{He} = 60\%$  nie zaobserwowano jednak istotnych zmian wpływu temperatury powietrza na właściwości sorpcyjne próbek. Na rysunku 7 przedstawiono zmiany sorpcji wilgoci w funkcji temperatury i wilgotności powietrza. Na wykresie można zauważyć, że wzrost sorpcji istotnie zwiększa się dopiero powyżej wilgotności  $R_{He} = 60\%$  i osiąga wartość maksymalną przy wilgotności  $R_{He} = 80\%$  i temperaturze  $T_e = 35^\circ\text{C}$ .

Spostrzeżenie to może być niezwykle istotne z punktu widzenia przechowalności tego typu wyrobów. Prawdopodobnie w ekstrudatach w warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności żelifikowana skrobia charakteryzuje się zmienną sorpcją.

## Wnioski

1. Sorpcja wilgoci ekstrudowanych wyrobów jest proporcjonalna do powierzchni pofałdowania ekstrudatu.
2. Zmiany temperatury wewnątrz komory w zakresie od  $25\text{--}35^\circ\text{C}$  mają niewielki wpływ na zmiany sorpcji wilgoci próbek.
3. Ekstrudowane produkty są wrażliwe na zmiany wilgotności powietrza, o czym świadczył szybki wzrost sorpcji w pierwszych 10 godzinach ekspozycji próbek w komorze klimatycznej.

## Literatura

- Billar, E. (2006). Dynamika zmian barwy podczas obróbki termicznej pieczywa pszennego w zależności od czasu miesienia ciasta. *Inżynieria Rolnicza*, 7(82), 43-50.
- Cheyen, A.; Barnes, J.; Gedney, S.; Wilson, D. I. (2004). Extrusion behaviour of cohesive potato starch pastes: II Microstructure – process interactions. *Journal of Food Engineering*, 66, 13–24.
- Ekielski, A.; Billar, E.; Żelaziński, T. (2005). Wpływ wybranych parametrów procesu ekstruzji na zmiany barwy ekstrudatu. *Inżynieria Rolnicza*, 10(70), 65-73.
- Ekielski, A.; Majewski, Z.; Żelaziński, T. (2007). Effect of Extrusion Conditions on Physical Properties of Buckwheat-Maize Extrudate. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 57, 2(A), 57-61.
- Galus, S.; Lenart, A. (2011). Wpływ białka i glicerolu na kinetykę adsorpcji pary wodnej przez powłoki sojowe. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 9-13.
- Janowicz, M.; Lenart, A.; Sikora, K. (2007). Adsorpcja pary wodnej przez ciastka biszkoptowe wielowarstwowe. *Inżynieria Rolnicza*, 5(93), 205-211.
- Kulchan, R.; Suppakul, P.; Boonsupthip, W. (2010). *Texture of glassy tapioca-flourbased baked product as a function of moisture content*. In: Reid, D.S., Sajjaanantakul, T., Lillford, P.J., Charoenrein, S. (Eds.), *Water Properties in Food, Health, Pharmaceutical and Biological Systems: ISOPOW 10*. Wiley-Blackwell, New York.
- Lewicki, P. P. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms, *Journal of Food Process Engineering*, 21, 127-144.
- Marzec, A.; Lewicki, P. (2004). Sorption properties of crunchy bakery products. *Żywność, Technologia, Jakość*, 4(41), 44–56.

- Mościcki, L.; Mikrus, M.; Wojtowicz, A. (2007). *Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym*. Warszawa, PWRiL, ISBN 9788309010272.
- Sokołowska, Z.; Jamroz, J.; Bańka, P. (2008). Apparent surface area of selected meal extrudates. *International Agrophysics*, 22, 75-80.
- Wójtowicz, A.; Mościcki, L. (2009). Influence of extrusion-cooking parameters on some quality aspects of precooked pasta-like products. *Journal of Food Science*, 74(5), 226-233.

## THE EFFECT OF THE SURFACE DEVELOPMENT OF EXTRUDATE ON THE DYNAMICS OF WATER SORPTION IN VARIOUS STORAGE CONDITIONS

**Abstract.** Changes of the dynamics of water absorption by grain extrudates in variable climatic conditions were presented in the research. Maize extrudate samples produced on the one-screw extruder were tested. The obtained samples were stored in a climatic chamber in variable conditions of temperature, relative humidity of air and storage time. For determination of the surface development of a sample, the image analysis system was applied in which normalizing coefficient  $R_{AE}$  was determined. Tests were carried out for three levels of surface development of a sample and three scopes of moisture, temperature and time of staying in the climatic chamber. Particular levels of variables were coded as numerical values - 1,0,1 and were subjected to analysis of variance ANOVA. A significant impact of the surface development of the extrudate on the speed of achieving the state of lowered sorption by the sample was reported.

**Key words:** extrusion, image analysis, water sorption, surface development

**Adres do korespondencji:**

Adam Ekielski; e-mail: adam\_ekielski@sggw.pl  
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 164  
02-787 Warszawa