

THE VISION SYSTEM USAGE AS DATA SOURCE FOR STATISTICAL PROCESS CONTROL IN THE FOOD EXTRUSION

WYKORZYSTANIE SYSTEMU WIZYJNEGO DO STATYSTYCZNEJ KONTROLI PRZEBIEGU PROCESU EKSTRUZJI PRODUKTÓW ŻYWNOŚCIOWYCH

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

Warsaw University of Life Sciences, Faculty of Production Engineering,
Department of Production Management and Engineering, Warsaw / Poland
Tel: +48 22 59 345 00; e-mail: tomasz_zelazinski@sggw.pl

Abstract: The aim of this study was to use a vision system for statistical quality control of the course of extruded products quality changes described by the expansion coefficient of the product and the color distribution. The expansion coefficient was measured directly at the extruder nozzle and referred to the resulting changes in the electric current values recorded during the extrusion process. Tests were carried out on a single screw extruder with a screw length to its diameter ratio $L2/D2 = 6.5$ and nozzle diameter $D = 10$ mm.

Material intended for the extrusion process was a mixture of crushed maize (80%) and buckwheat (20%) humidified to a moisture content of 17%. The results suggest that the direct observation and analysis of the extrusion process using vision systems can be a sensitive instrument supporting the process control. This is indicated by the changes of the radial expansion coefficient and color (Lab) of products measured directly at the extruder nozzle and simultaneously recorded changes in the intensity of electric current drawn by the extruder's motor.

Keywords: extrusion, stability, expansion, color

INTRODUCTION

Extrusion of raw plant materials is a very complex process, which consists of a number of factors such as geometry of working elements, screw and feeder rotation speed and process temperature [7; 11; 12]. On the other hand, for the proper course of the process extremely important factors are also material properties of the input, i.e. type and chemical composition of feedstock, blend composition, fragmentation degree and humidity [3;9;13;18]. The combination of both one and the second parameters contributes further to the 'output' changes of extrusion, which are process pressure and energy consumption [1;14;19]. Collation of all these variables gives a very large number of input data and, consequently, many significant factors and their interaction during the process. This makes difficult, in some cases, the accurate and stable maintenance of the extrusion process [6; 14; 20].

For a stable process flow follows parallel the quality of the product, which can be a sensitive factor that reflects the continuity of the process. To test the quality of extruded products, a wide range of physical and chemical methods are used, included determination of density, expansion coefficients, strength parameters, water absorption index and water solubility index, testing of gelatinisation degree, water activity, micro and macroelements content etc. [14; 15]. With many qualitative methods, parameters that initially and quickly allow to describe the quality of extruded products are

Abstrakt: Celem niniejszej pracy było zastosowanie systemu wizyjnego do statystycznej kontroli przebiegu zmian jakościowych wyrobów ekstrudowanych opisanej współczynnikiem ekspansji produktu oraz rozkładu barwy. Wartości współczynnika ekspansji mierzono bezpośrednio przy dyszy wylotowej ekstrudera, a następnie odniesiono do uzyskanych zmian wartości natężenia prądu elektrycznego rejestrowanych podczas przebiegu procesu ekstruzji. Badania przeprowadzono na jednoślindakowym ekstruderze o stosunku długości ślimaka do jego średnicy $L2/D2=6,5$ i średnicy dyszy wylotowej $D=10$ mm. Materiałem przeznaczonym do procesu ekstruzji była mieszanka rozdrobnionej kukurydzy (80%) i gryki (20%) nawilżonej do wilgotności 17%. Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że obserwacja i bezpośrednia analiza przebiegu procesu ekstruzji za pomocą systemów wizyjnych może stanowić czuły przyrząd wspomagający sterowanie procesem ekstruzji. Wskazują na to uzyskane zmiany wskaźnika ekspansji radialnej i barwy (Lab) produktów mierzonych bezpośrednio przy dyszy wylotowej ekstrudera oraz równoległe rejestrowane zmiany natężenia prądu elektrycznego pobieranego przez silnik ekstrudera.

Słowa kluczowe: ekstruzja, stabilność, ekspansja, barwa

WSTĘP

Ekstruzja surowców roślinnych to bardzo złożony proces, na który składa się wiele czynników takich, jak geometria elementów roboczych ekstrudera, prędkość obrotowa ślimaków i podajnika oraz temperatura procesu [7; 11; 12]. Z drugiej strony, dla prawidłowego przebiegu procesu niezwykle istotnymi czynnikami są też własności materiału wejściowego, czyli rodzaj i skład chemiczny stosowanego surowca, skład mieszanki oraz jej stopień rozdrobnienia i wilgotność [3;9;13;18]. Połączenie zarówno jednych, jak i drugich parametrów przyczynia się dalej do zmian „wynikowych” ekstruzji, jakimi są ciśnienie procesu oraz pobór energii elektrycznej [1;14;19]. Zestawienie tych wszystkich zmiennych daje bardzo dużą liczbę danych wejściowych, a w konsekwencji wiele czynników istotnych oraz ich interakcji zachodzących podczas procesu. Sprawia to, że prawidłowe i stabilne utrzymanie procesu ekstruzji w niektórych przypadkach może być trudne [6; 14; 20].

Oczywiście za stabilnym przebiegiem procesu podąża równoległe jakość produktu, która może być wrażliwym czynnikiem odzwierciedlającym ciągłość przebiegu procesu. Powszechnie do badań jakości wyrobów ekstrudowanych wykorzystuje się szereg metod fizycznych i chemicznych, do których można zaliczyć wyznaczanie gęstości, wskaźników ekspansji, parametrów wytrzymałościowych, wskaźników wodochłonności i wodorozpuszczalności, badania stopnia żelifikacji, aktywności wody, zawartości mikro i makroelementów itp. [14; 15]. Z wielu metod jakościowych, parametrami, które

mainly expansion coefficients and parameters of color and shape [4;5;17]. The values of these quantities can be measured relatively easily during the process, for example, directly at the extruder nozzle. Performed in this manner, measurements increase the possibility of observation and process control, contributing to a more precise control of the extrusion, especially during the processing of raw plant materials that are difficult to convert, such as heterogeneous or with high humidity materials.

Considering the above, the aim of this study was to investigate the course of qualitative changes of extruded products, which were measured directly at the nozzle of the extruder, and then reference the results to changes in electric current recorded during the extrusion process.

MATERIAL AND METHOD

Research material

The research material intended for extrusion was a blend of crushed Credo varieties of maize (80%) and Luba varieties of buckwheat (20%). Table 1 shows an example of the size distribution of grit. The individual raw materials were mixed and moistened with water to a moisture content of 17% using a laboratory mixer (type Agrometr Inofama). Before the extrusion, blend was conditioned for a period of about 20 min.

wstępnie i szybko pozwalają opisać jakość wyrobów ekstrudowanych są głównie wskaźniki ekspansji oraz parametry barwy i kształtu [4;5;17]. Wartości tych wielkości można w stosunkowo prosty sposób zmierzyć w trakcie trwania procesu np. bezpośrednio przy dyszy wylotowej ekstrudera. Wykonywane w ten sposób pomiary zwiększają możliwości obserwacji i kontroli przebiegu procesu, przyczyniając się do bardziej precyzyjnego sterowania procesem ekstruzji, szczególnie podczas ekstruzji surowców roślinnych trudnych do przetworzenia np. niejednorodnych lub o wysokiej wilgotności.

Biorąc pod uwagę powyższe, celem niniejszej pracy było zbadanie przebiegu zmian jakościowych wyrobów ekstrudowanych, które mierzono bezpośrednio przy dyszy wylotowej ekstrudera, a następnie odniesienie wyników do zmian natężenia prądu elektrycznego rejestrowanych podczas przebiegu procesu ekstruzji.

MATERIAŁ I METODYKA

Materiał badawczy

Materiałem badawczym przeznaczonym do procesu ekstruzji była mieszanka rozdrobnionej kukurydzy odmiany Credo (80%) i gryki odmiany Luba (20%). W tabeli 1 przedstawiono przykładowy skład granulometryczny grysu. Poszczególne surowce mieszano i nawilżano wodą do wilgotności 17% za pomocą mieszalnika laboratoryjnego (typ Agrometr Inofama). Mieszanka przed poddaniem procesowi ekstruzji była kondycjonowana przez czas około 20 min.

Table 1

Granulometric size distribution of raw materials subjected to extrusion process [%]

Fraction [mm]	Corn	Buckwheat
>2	3.5	2.7
2-1.5	3.4	4.3
1.5-1.2	0.2	0.2
1.2-1.02	3.3	4.1
1.02-0.75	31.7	21.5
0.75-0.6	7.8	4.6
0.6-0.43	17.9	14.8
0.43-0.25	19.7	15.4
<0.25	12.5	32.4

Extrusion process

To perform the research, it was used a modified single screw extruder KZM-2 with a screw length to diameter ratio $L2/D2 = 6.5$ and 10 mm nozzle diameter. Screw speed of the extruder was $170 \text{ rpm} \cdot \text{min}^{-1}$ with an efficiency of $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Power of extruder's engine was 22 kW. The extruder was equipped with a system to maintain the temperature in the extruder barrel (heater with a power of 2000 watts and a thermostat) that allowed to control the extrusion temperature of about $150\text{-}160^\circ\text{C}$ in the last section of the extruder. In addition, the extruder was equipped with a thermocouple positioned in the machine head, clamp (type Z202A, METRAWAT, AC 0..20/200) to measure the electric current drawn by the extruder's engine, the temperature sensor (thermocouple) TP-371J and adjustable single screw material feeder.

In order to obtain an image of the extrudate, CCD color camera KP-FD30 HITACHI was placed at the extruder's nozzle, mounted on a tripod, and a fan to blow off steam. The whole was illuminated by fluorescent daylight D65 Philips TL-D De Luxe Pro 18W/965.

Sensors and a camera were combined with a set for data acquisition (National Instrument) and a PC. Then both figures and images were recorded at intervals of 1 second.

Proces ekstruzji

Do badań zastosowano zmodyfikowany jednoślismakowy ekstruder KZM-2 o stosunku długości ślimaka do jego średnicy $L2/D2=6,5$ i dyszy wylotowej 10 mm. Prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera wynosiła $170 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, przy wydajności $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Moc silnika ekstrudera wynosiła 22 kW. Ekstruder wyposażony był w układ do podtrzymywania temperatury w cylindrze ekstrudera (grzałka o mocy 2000 wat i termostat) pozwalający na kontrolowanie temperatury ekstruzji wynoszącej około $150\text{-}160^\circ\text{C}$ w ostatniej sekcji ekstrudera. Dodatkowo ekstruder wyposażony był w termoparę umiejscowioną w głowicy maszyny, cęgi (typu Z202A firmy METRAWAT, AC 0..20/200) do pomiaru natężenia prądu pobieranego przez silnik ekstrudera, czujnik temperatury (termopary) typu TP-371J oraz regulowany jednoślismakowy podajnik surowca.

W celu uzyskania obrazu ekstrudatu, przy dyszy wylotowej ekstrudera umieszczono kolorową kamerę CCD KP-FD30 firmy HITACHI zamontowaną na statywie oraz wentylator do zdmuchiwania pary wodnej. Całość oświetlano świetłówkami światła dziennego D65 firmy Philips TL-D De Luxe Pro 18W/965.

Czujniki oraz kamerę połączono z zestawem do akwizycji danych firmy National Instrument i komputerem PC. Następnie zarówno dane liczbowe oraz zdjęcia

Numerical files were recorded in Excel 2003. Photographs were saved in TIF format.

Data were recorded from the start of the extrusion process to its completion, but for the purposes of the study a section of the extrusion process with a length of 305 measurement points (305 seconds) was analyzed.

Methods of qualitative research

To measure the degree of radial expansion LabView program, Vision Assistance. 7.1 for image analysis was used. The program enabled the precise measurement of the extrudate diameter, which was measured at a distance of about 10 cm from the extruder's nozzle.

Expansion coefficient was calculated according to the formula below [2]:

$$SEI = \frac{S_e}{S_d} \quad (1)$$

where: S_e - extrudate diameter, S_d - nozzle diameter.

The study of the color was performed using Adobe Photoshop 6.0. CE, in which, using the "histogram" function, values of the parameters L^* , a^* , b^* for each field were obtained, which had to be calculated by the following equations [10]:

$$L^* = \frac{L}{255} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120 \quad (3)$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120 \quad (4)$$

where: L - brightness, a - color indicator changing from green to red, b - color indicator changing from yellow to blue, L^* , a^* , b^* - the correct values of the color after standardization.

Statistical analysis

For statistical analysis it was used a module of statistical quality control (SPC) of STATISTCA 10 program. For presentation and preliminary analysis of the recorded data there were used control charts (individual observations and moving gap) available in the module DOE, industry statistics. In a further step ANOVA analysis was performed, followed by the presentation of individual variables on the graphs in the form of three-dimensional approximated surface responses.

In order to present and provide accurate experimental data analysis, obtained results were recorded using the so-called control charts, on which the boundary conditions of process stability were marked as: lower control limit, LCL, and upper control limit, UCL determined for the central line (actual mean value of n samples). The limits LCL and UCL were set at $(\pm)3$ of calculated sigma value (standard deviation of individual points), [16].

RESULTS

The results show that extrusion is a complex process. Even during the stabilized course using single screw extruder there may be significant variations in power consumption and related changes in the quality of the resulting products. Especially it can be seen clearly by on-

rejestrowano w odstępach 1 sekundowych. Pliki liczbowe zapisywano w programie Excel 2003. Zdjęcia były zapisywane w formacie TIF.

Dane rejestrowano od rozpoczęcia procesu ekstruzji do jego zakończenia, jednak dla potrzeb badań analizowano odcinek przebiegu procesu ekstruzji o długości 305 punktów pomiarowych (305 sekund).

Metodyka badań jakościowych

Do pomiaru stopnia ekspansji radialnej wykorzystano program do analizy obrazu LabView, Vision Assistance. 7.1. Program umożliwiał precyzyjne zmierzenie średnicy ekstrudatu, którą mierzono w odległości około 10 cm od dyszy wylotowej ekstrudera.

Wskaźnik ekspansji obliczano według wzoru [2]:

$$SEI = \frac{S_e}{S_d} \quad (1)$$

gdzie: S_e - średnica ekstrudatu, S_d - średnica dyszy.

Badania barwy wykonano wykorzystując program Adobe Photoshop 6.0. CE, w którym za pomocą funkcji „histogram” uzyskiwano wartości parametrów L^* , a^* , b^* dla każdego pola, które należało wyliczyć według poniższych zależności [10]:

$$L^* = \frac{L}{255} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120 \quad (3)$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120 \quad (4)$$

gdzie: L - jasność, a - wskaźnik barwy zmieniający się od koloru zielonego do czerwonego, b - wskaźnik barwy zmieniający się od koloru żółtego do niebieskiego, L^* , a^* , b^* - prawidłowe wartości parametrów barwy po standaryzacji.

Analiza statystyczna

Do analizy statystycznej wykorzystano moduł statystycznej kontroli jakości (SPC) programu STATISTCA 10. Do przedstawienia oraz wstępnej analizy zarejestrowanych danych zastosowano karty kontrolne (obserwację pojedyncze i ruchomy rozstęp) dostępne w module DOE, statystyki przemysłowe. W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę ANOVA, a następnie poszczególne zmienne zaprezentowano na wykresach trójwymiarowych w postaci aproksymowanych powierzchni odpowiedzi.

W celu przedstawienia oraz dokładniejszej analizy danych doświadczalnych uzyskane wyniki rejestrowano za pomocą tzw. kart kontrolnych, na których warunki brzegowe stabilności procesu zostały oznaczone jako: dolna granica kontrolna - lower control limit, LCL oraz górna granica kontrolna - upper control limit, UCL wyznaczonych dla linii centralnej (średnia rzeczywista z n próbek). Granice LCL i UCL ustalono na poziomie $(\pm)3$ wielkości obliczonej sigmy (odchylenie standardowe pojedynczych punktów), [16].

WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki badań pokazują, że ekstruzja to proces złożony, Nawet podczas ustabilizowanego przebiegu z wykorzystaniem ekstrudera jednoślismakowego mogą występować znaczne odchylenia w poborze prądu elektrycznego i związane z tym zmiany jakościowe uzyskiwanych produktów. Szczególnie wyraźnie można to

line recording of the basic parameters of the resulting products, such as radial expansion and the color indices L^* , a^* , b^* , and monitoring of the electric current drawn by the extruder's engine.

Figure 1 below shows the control chart recording process of power consumption by the extruder's engine. On the graph it can be clearly seen that part of the points go beyond the established boundary lines, which may indicate some deregulation of the process. Locally, between 130 and 250 second occurrence of the shift of the operating point can be observed, superimposed on the growth of the instability of its course. It is worthy to note that the cyclical nature of work point changes is manifested by periodic crossing of the lower or upper control line.

zaobserwować rejestrując on-line podstawowe parametry uzyskiwanych produktów takie, jak ekspansja radialna i wskaźniki barwy L^* , a^* , b^* oraz monitorując przebieg natężenia prądu pobieranego przez silnik ekstrudera.

Poniżej na rysunku 1 przedstawiono kartę kontrolną rejestrującą przebieg poboru prądu przez silnik ekstrudera. Na wykresie można wyraźnie zaobserwować, że część punktów wychodzi poza ustalone linie graniczne, co może świadczyć o pewnym rozregulowaniu procesu. Lokalnie pomiędzy 130 a 250 sekundą można zaobserwować wystąpienie przesunięcia się punktu pracy, nakładające się na wzrost niestabilności jego przebiegu. Warto zwrócić uwagę na cykliczność zmiany punktu pracy przejawiającą się okresowym przekraczaniem dolnej lub górnej linii kontrolnej.

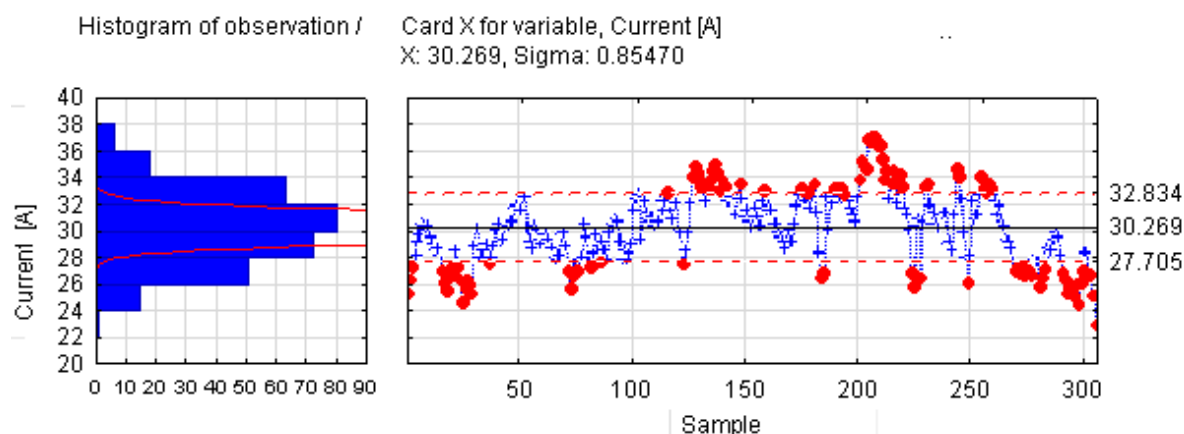


Fig. 1 - Record of the course of the changes in the intensity of electric current drawn by the extruder's engine

The variation of the radial expansion is also characterized by a similar course, where part of the values exceeds the limits established by UCL and LCL too (Fig. 2). This behavior may indicate that some correlation may occur between these two parameters. However, the rate of expansion shows no drift in value over time, but only increased dispersion of the measured results. It can therefore be assumed that stabilizing the electrical current draw will largely contribute to a more stable quality of extruded products.

Podobnym przebiegiem charakteryzuje się również zmienność wskaźnika ekspansji radialnej, której część wartości także przekracza granice ustalonych UCL i LCL (rys. 2). Takie zachowanie może świadczyć, że pomiędzy tymi dwoma parametrami może występować pewna korelacja. Niemniej wskaźnik ekspansji wykazuje brak dryftu wartości w czasie, a jedynie zwiększony rozrzut wyników pomiarowych. Można zatem przypuszczać, że ustabilizowanie wartości poboru prądu elektrycznego w dużej mierze przyczyni się do bardziej ustabilizowanych jakościowo wyrobów ekstrudowanych.

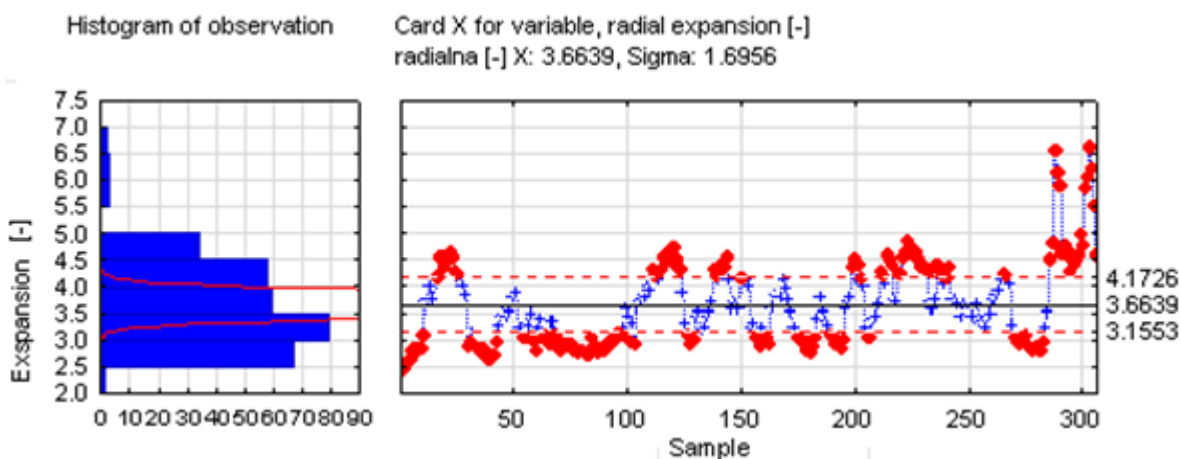


Fig. 2 - Record of changes in the course of the radial expansion index

Based on tests performed it was found that the change of the radial expansion and the electric current drawn by the extruder followed extrudates color change. That is why on the following courses (Fig.3, 4, 5) there can be observed the changes in color parameters L^* , a^* , b^* measured in parallel to the expansion values. Analyzing the results it can be concluded that the color change is also very sensitive indicator of the quality of the resulting products, however, from the standpoint of extrusion process stability control seems to be less sensitive indicator than the radial expansion values. This is indicated by a small number of variables passing through the established boundaries of stability.

Na podstawie wykonanej próby stwierdzono, że za zmianą ekspansji radialnej oraz natężeniem prądu elektrycznego pobieranego przez ekstruder podążały również zmiany barwy ekstrudatów. Dlatego też na poniższych przebiegach (rys.3, 4, 5) można zaobserwować zmiany parametrów barwy L^* , a^* , b^* mierzonych równoległe z wartościami ekspansji. Analizując wyniki można stwierdzić, że zmiany barwy są również bardzo czułym wskaźnikiem jakościowym uzyskiwanych produktów, jednak z punktu widzenia kontroli stabilności procesu ekstruzji wydają się być mniej wrażliwym wskaźnikiem niż wartości ekspansji radialnej. Wskazuje na to niewielka liczba zmiennych przechodzących przez ustalone granice stabilności.

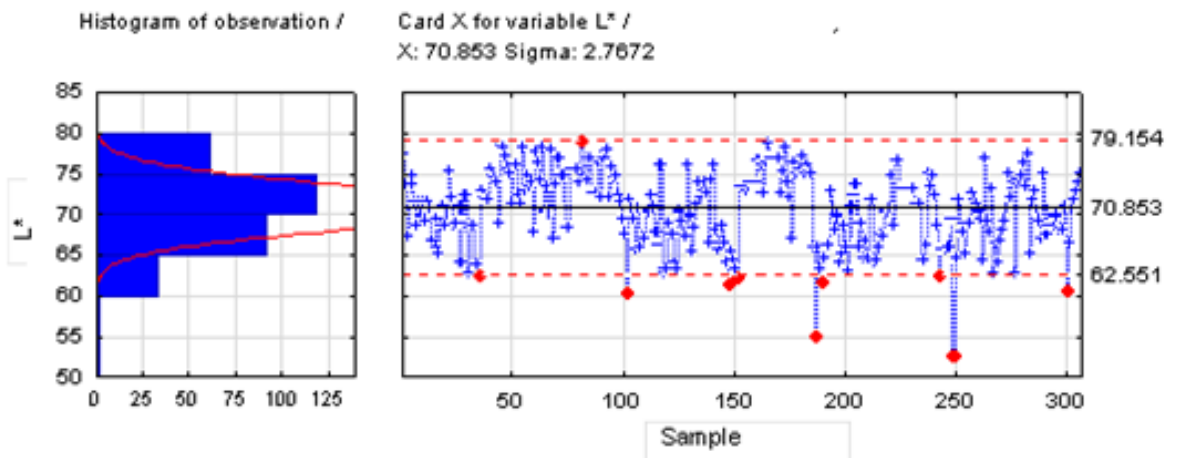


Fig. 3 - Record of changes in the course of color indicator L^*

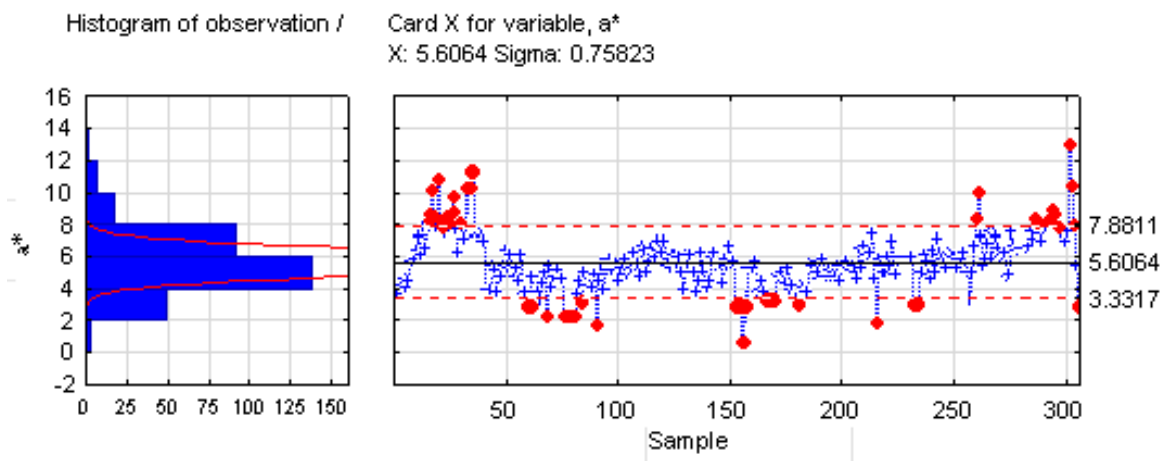
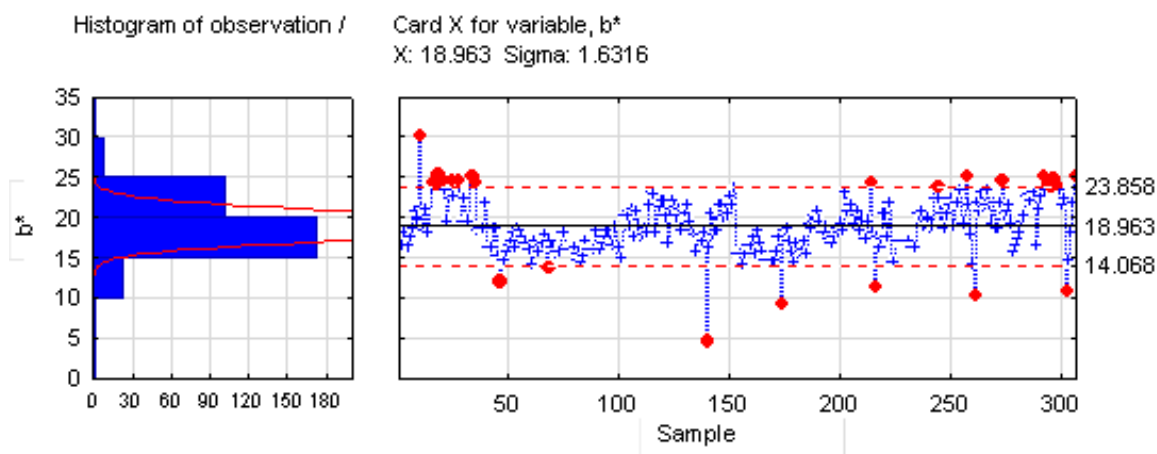


Fig. 4 - Record of changes in the course of color indicator a^*

Fig. 5 - Record of changes in the course of color indicator b^*

The resulting courses allow to conclude that direct observation and analysis of the process of extrusion using vision systems can be a sensitive instrument supporting the extrusion process control. This is indicated by the research results of changes of all qualitative indicators and parallel recorded courses of electric current drawn by the extruder's engine. Given the above, it seems appropriate to examine correlations between changes in current consumption and quality parameters of extruded products. Therefore, in order to confirm this thesis a statistical analysis of the results obtained was conducted.

The following table 2 presents the results of ANOVA analysis, which show that the variation of all the parameters analyzed, that is the rate of radial expansion and the color indices L^* , a^* , b^* , was statistically significant ($p < 0.05$). While in the case of radial expansion and the color index b^* it was found that the effect of current intensity has a linear course, and in the case of color indices a^* and b^* the course found was linear and quadratic.

Uzyskane przebiegi pozwalają stwierdzić, że obserwacja i bezpośrednia analiza przebiegu procesu ekstruzji za pomocą systemów wizyjnych może stanowić czuły przyrząd wspomagający sterowanie procesem ekstruzji. Wskazują na to uzyskane wyniki badań zmian wszystkich wskaźników jakościowych oraz równoległe rejestrowane przebiegi natężenia prądu elektrycznego pobieranego przez silnik ekstrudera. Biorąc pod uwagę powyższe, wydaje się słuszne poszukiwanie zależności pomiędzy zmianami poboru prądu a parametrami jakościowymi wyrobów ekstrudowanych. Dlatego w celu potwierdzenia powyższej tezy przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników badań.

W poniższej tabeli 2 zamieszczono wyniki analizy ANOVA, które pokazują, że zmienność wszystkich analizowanych parametrów, czyli wskaźnika ekspansji radialnej oraz wskaźników barwy L^* , a^* , b^* , była istotnie statystycznie ($p < 0,05$). Przy tym w przypadku ekspansji radialnej i wskaźnika barwy b^* stwierdzono, że wpływ natężenia prądu miał przebieg liniowy, natomiast w przypadku wskaźników barwy a^* i b^* stwierdzono przebieg liniowy i kwadratowy.

Table 2

Anova table with important factors for $p < 0.05$

Factor	Radial expansion [-] ($R^2=0.2965$)				p
	SS	df	MS	F	
Current	1.6598	1	1.6598	3.0893	0.07982
Current ²	3.9824	1	3.9824	7.4121	0.00685*
Error	162.7945	303	0.5373		
Całk. SS	167.7604	305			
	L^* ($R^2=0.2384$)				
Current	75.207	1	75.207	3.8342	0.05114
Current ²	81.484	1	81.4844	4.1542	0.0424*
Error	5943.312	303	19.6149		
Całk. SS	6128.638	305			
	a^* ($R^2=0.2834$)				
Current	71.785	1	71.7853	23.0469	0.000002*
Current ²	34.048	1	34.0481	10.9313	0.00106*
Error	943.769	303	3.1148		
Całk. SS	1036.534	305			
	b^* ($R^2=0.2879$)				
Current	123.883	1	123.8833	13.4455	0.00029*
Current ²	208.241	1	208.2406	22.6011	0.000003*
Error	2791.762	303	9.2137		
Całk. SS	3081.140	305			

*- Significant difference at the level of $p < 0,05$

The results of above analysis are shown on a three-dimensional graphs presenting the changes in electric current as a function of radial expansion [ER] and the color indices L^* , a^* , b^* . The graph in Figure 6 shows electric current changes as a function of index L^* and the ER. In the figure it can be seen that ER index increases with increasing current reaching a maximum value of ER amounting 5-6 [-]. At the same time it can be observed that with the ER increase, product brightness L^* increases too. Moreover, there can also be noticed a sudden downward inflection in the graph (a decrease of electric current), where the product reached the highest rate of ER = 6.5 [-] and the sudden reduction in the brightness L^* , which was probably associated with the local overheating of the material in the extruder.

Wyniki powyższej analizy przedstawiono za pomocą trójwymiarowych wykresów przedstawiających zmiany natężenia prądu w funkcji ekspansji radialnej [ER] oraz wskaźników barwy L^* , a^* , b^* . Na wykresie rys. 6 pokazano zmiany natężenia prądu elektrycznego w funkcji wskaźnika barwy L^* oraz ER. Na rysunku można zaobserwować, że wskaźnik ER zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia prądu, osiągając maksymalne wartości ER wynoszące ok. 5-6 [-]. Jednocześnie można zaobserwować, że wraz ze wzrostem ER zwiększa się również jasność produktu L^* . Na wykresie można również zaobserwować nagłe przegięcie wykresu ku dołowi (spadek natężenia prądu elektrycznego), gdzie produkt osiągał najwyższy wskaźnik ER = 6,5 [-] oraz nagłe zmniejszenie jasności L^* , które związane było prawdopodobnie z lokalnym przegrzewaniem się materiału w ekstruderze.

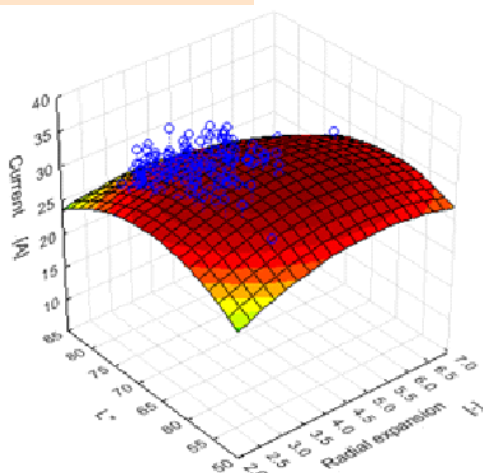


Fig. 6 - Changes in the current as a function of changes in L^* and the radial expansion coefficient

Although the color values of a^* and b^* were in most cases within UCL and LCL lines, on the approximated graphs some course trends can be observed. It was found that in the case of graph on Figure 7, the value of the parameter a^* slightly increased with the decrease in current. Simultaneously with the increase in the ER, no significant changes were noticed in this parameter.

Pomimo, że wartości parametrów barwy a^* i b^* mieściły się w większości przypadków granicach linii UCL i LCL, na aproksymowanych wykresach można zaobserwować pewne trendy przebiegu. Stwierdzono, że w przypadku wykresu na rys. 7, wartość parametru a^* nieznacznie zwiększała się wraz ze zmniejszeniem natężenia prądu. Jednocześnie wraz ze wzrostem ER nie zaobserwowano znaczących zmian tego parametru.

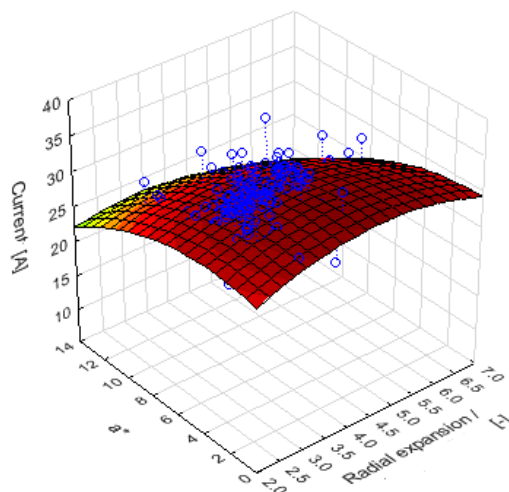


Fig. 7 - Changes in the current as a function of changes in the color index a^* and radial expansion

Analyzing the changes in the parameter b^* (Fig. 8), it could be concluded that the parameter has been changing along with changes in current drawn by the extruder. Most significantly, however, the changes were observed at small values of the parameter b^* from about 0-10, and for the products whose ER was about 2-3.5.

Analizując zmiany parametru b^* (rys. 8), można było z kolei stwierdzić, że wskaźnik zmieniał się wraz z zmianami natężenia prądu pobieranego przez ekstruder. Najbardziej wyraźnie zmiany obserwowano jednak przy małych wartościach parametru b^* od około 0-10 oraz dla produktów, których ER wynosiła około 2-3,5.

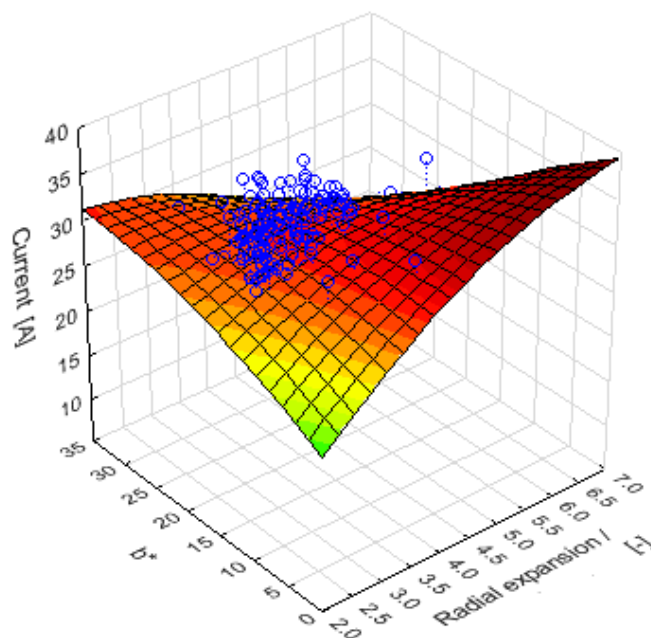


Fig. 8 - Changes in current intensity as a function of color changes b^* and the rate of radial expansion

CONCLUSIONS

1. The results achieved allowed to conclude that observation and direct analysis of the extrusion process using vision systems can be a sensitive instrument supporting the extrusion process control. This is shown by changes in the obtained results, the radial expansion coefficient and the color coefficients (Lab) of products measured directly at the outlet extruder's nozzle and simultaneously recorded changes in the intensity of electric current drawn by the extruder's engine.

2. The initial use of control charts to present and analyze the results of changes in electric current and the quality parameters of the extrudate (corn - buckwheat) looks very promising. It should be noted, however, that setting the appropriate value of the UCL and LCL for the extrusion process may require probably carrying out a series of preliminary studies.

3. The results presented in the approximated surface responses graphs suggest that even in a stable process it can be traced to certain trends. Estimation of process variables describing its correct course may allow the determination of the optimal threshold values describing the quality of the obtained products.

REFERENCES

[1]. Akdogan H., Rui L., Oliveira T. J. C., (1997) - *Rheological properties of rice starch at high moisture contents during twin-screw extrusion*. Food Science and Technology, 30 (5), 488-496;

WNIOSKI

1. Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że obserwacja i bezpośrednia analiza przebiegu procesu ekstruzji za pomocą systemów wizyjnych może stanowić czuły przyrząd wspomagający sterowanie procesem ekstruzji. Wskazują na to uzyskane wyniki badań zmian wskaźnika ekspansji radialnej i barwy (Lab) produktów mierzonej bezpośrednio przy dyszy wylotowej ekstrudera oraz równoległe rejestrowane zmiany natężenia prądu elektrycznego pobieranego przez silnik ekstrudera.

2. Wstępne zastosowanie kart kontrolnych do przedstawienia i analizy uzyskanych wyników zmian natężenia prądu elektrycznego oraz parametrów jakościowych ekstrudatu (kukurydziano – gryczanego) wygląda bardzo obiecująco. Należy jednak zaznaczyć, że ustawienie odpowiednich wartości UCL i LCL w przypadku procesu ekstruzji może wymagać prawdopodobnie przeprowadzenia szeregu badań przedwstępnych.

3. Uzyskane wyniki przedstawione na wykresach aproksymowanych powierzchni odpowiedzi sugerują, że w nawet w ustabilizowanym procesie można doszukiwać się pewnych trendów. Oszacowanie wartości wielkości procesowych opisujących prawidłowy jego przebieg może pozwolić na optymalne ustalenie wartości progowych opisujących jakość uzyskiwanych wyrobów.

LITERATURA

[1]. Akdogan H., Rui L., Oliveira T. J. C., (1997) - *Właściwości reologiczne skrobi ryżowej o wysokich zawartościach wilgoci podczas ekstruzji dwuślimakowej*. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 30 (5), 488-496;

- [2]. Alvarez-Martinez L., Kondury K. P., Harper J. M., (1988) - *A general model for expansion of extruded products*. Journal of Food Science, 53, 609-615;
- [3]. 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), 142-148;
- [4]. Ekielski A., (2013) - *The use of image analysis for assessment of selected parameters describing the porous structures on the example of cereal extrudates*. The village of tomorrow Publishing House. ISBN 978-83-62815-21-0;
- [5]. Ekielski A., Biller E., Żelaziński T. (2005) - *Effect of extrusion process parameters on the color changes of the extrudate*. Agricultural Engineering, 10 (70), 65-73;
- [6]. 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;
- [7]. 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, 108-117;
- [8]. 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), 237-244;
- [9]. Gondek E, Jakubczyk E, Wieczorek B., (2013) - *The physical properties of gluten-free crispbread*. Teka Automotive and Energy Commission of Agriculture Sciences 574, 29-38;
- [10]. Kit L. Y., Spyrydion E., Papadakis E., (2004) - *A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces*. Journal of Food Engineering, 61 (1), 137-142;
- [11]. 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, 145-152;
- [12]. Mitrus M., (2005) - *Changes of specific mechanical energy during extrusion cooking of thermoplastic starch*. Teka Automotive and Energy Commission of Agriculture Sciences, 5, 152-157;
- [13]. Moraru C. I., Kokini J. L., (2003) - *Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods*. Comprehensive Reviews in Food Science and food Safety, 2, 120-138.
- [14]. Mościcki L., Mitrus M., Wójtowicz A., (2007) - *Extrusion technique in food industry*. PWRiL, Warszawa;
- [15]. Perez A. A., Drago S. R., Carrara C. R., De Greef D. M., (2008) - *Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity*. Journal of Food Engineering, 87 (3), 323-332;
- [16]. Statsoft Handbook,
<http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
- [17]. Sacchetti G., Pinnavaia G. G., Guidolin E., Dalla Rosa M., (2004) - *Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products*. Food Research International, 37 (5), pp.527-534;
- [2]. Alvarez-Martinez L., Kondury K. P., Harper J. M., (1988) - *Ogólny model ekspansji wyrobów ekstrudowanych*. Journal of Food Science, 53, 609-615;
- [3]. Ding Q.-B., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G., Marson H., (2006) - *Wpływ warunków wytłaczania na funkcjonalne i fizyczne właściwości ekspandowanych przekąsek na bazie pszenicy*. Journal of Food Engineering, 73 (2), 142-148;
- [4]. Ekielski A., (2013) - *Wykorzystanie analizy obrazu do oceny wybranych parametrów opisujących struktury porowate na przykładzie ekstrudatów zbożowych*. Wyd. Wieś Jutra. ISBN 978-83-62815-21-0;
- [5]. Ekielski A., Biller E., Żelaziński T., (2005) - *Wpływ wybranych parametrów procesu ekstruzji na zmiany barwy ekstrudatu*. Inżynieria Rolnicza, 10 (70), 65-73;
- [6]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T., (2007) - *Wpływ warunków ekstruzji na właściwości fizyczne ekstrudatów gryczano-kukurydzianych*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 57-61;
- [7]. 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;
- [8]. 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;
- [9]. Gondek E, Jakubczyk E, Wieczorek B., (2013) - *Właściwości fizyczne bezglutenowego pieczywa chrupkiego*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 574, 29-38;
- [10]. Kit L. Y., Spyrydion E., Papadakis E., (2004) - *Prosta metoda obrazowania cyfrowego dla pomiaru i analizy koloru powierzchni żywności*. Journal of Food Engineering, 61 (1), 137-142;
- [11]. 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;
- [12]. Mitrus M., (2005) - *Zmiany jednostkowej energii mechanicznej podczas ekstruzji termoplastycznej skrobi*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, 5, 152-157;
- [13]. Moraru C. I., Kokini J. L., (2003) - *Zarodkowanie i ekspansja podczas ekstruzji i mikrofalowego ogrzewania produktów zbożowych*. Comprehensive Reviews in Food Science and food Safety, 2, 120-138.
- [14]. Mościcki L., Mitrus M., Wójtowicz A., (2007) - *Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym*. PWRiL, Warszawa;
- [15]. Perez A. A., Drago S. R., Carrara C. R., De Greef D. M., (2008) - *Ekstruzja mieszaniny kukurydzy i soi: Czynniki wpływające na właściwości produktu oraz lepkość dyspersji mąki*. Journal of Food Engineering, 87 (3), 323-332;
- [16]. Podręcznik Statsoft,
<http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
- [17]. Sacchetti G., Pinnavaia G. G., Guidolin E., Dalla Rosa M., (2004) - *Wpływ temperatury ekstruzji i składu wsadu na funkcjonalne, fizyczne i sensoryczne właściwości jak przekąsek na bazie kasztanów i mąki ryżowej*. Food Research International, 37 (5), 527-534;

[18]. Shankar T. J., Bndyopadhyay S., (2005) - *Process variables during single-screw extrusion of fish and rice-flour blends*. Journal of Food Processing and Preservation, 29 (2), 151-164;

[19]. Wójtowicz A., Mościcki L., (2008)-*Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta*. Teka Automotive and Energy Commission of Agriculture Sciences, 2, 311-318;

[20]. Żelaziński T., (2014) - *Effect of selected working parameters of single screw extruder on energy consumption in the extrusion process*. Annals of Warsaw University of Life Sciences, 63.

[18]. Shankar T. J., Bndyopadhyay S., (2005) - *Zmienne procesowe podczas jednoślismakowej ekstruzji mieszanek mąki rybnej i ryżowej*. Journal of Food Processing and Preservation, 29 (2), 151-164;

[19]. Wójtowicz A., Mościcki L., (2008) - *Zużycie energii podczas ekstruzji preparowanego makaronu*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, 2, 311-318;

[20]. Żelaziński T., (2014) - *Wpływ wybranych parametrów pracy wycłaczarki jednoślismakowej na zużycie energii w procesie ekstruzji*. Annals of Warsaw University of Life Sciences, 63.