

## THE EFFECT OF ULTRASOUND TREATMENT ON SELECTED MAIZE AND BUCKWHEAT EXTRUDATES PARAMETERS / WPLYW ULTRADŹWIĘKÓW NA WYBRANE PARAMETRY EKSTRUDATÓW KUKURYDZIANYCH I GRYCZANYCH

PhD. Eng. Żelaziński T., PhD. Eng. Ekielski A., 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: tomasz\_zelazinski@sggw.pl

**Abstract:** This study attempted to understand the influence of ultrasound pretreatment on quality of extrudates. The maize and buckwheat seeds were subjected to low power ultrasound at 40kHz frequency. The pretreated material was processed using extrusion cooking technology. The effect of the ultrasound waves on quality of extrudates produced from pretreated seeds and its grinds were investigated. Typical quality standard parameters like sectional expansion, volumetric expansion indices, water solubility index and water absorption index of extrudates were investigated by using central composition design. For all extrudates samples inner cells structure was also determined. The inner texture of extrudate as structure and configuration of pores were described using mean size of pores, their number on cross section unit, geometric orientation of pores. The extrudates produced from pretreatment materials were compared with extrudates obtained from non-treated material. Extrudates made from pretreated material showed different texture properties than produced from ultrasound untreated ones.

**Keywords:** ultrasound, food extrusion, buckwheat, maize

### INTRODUCTION

Extrusion is one of the most extensively used and promising method for ready-to-eat cereals and other processed food production. It is a process where a mixture of food ingredients is forced to flow through a die. Moisture, high shear, mass temperature and pressure applied during extrusion make it possible to convert raw starchy material for variety end uses (Desrumaux et al., 1998, Chang et al., 2001, Ekielski et al., 2007a). The pretreatment of raw materials in conditioners used in extrusion line is able to reduce energy consumption and improve the final product quality (Ekielski et al., 2007b, Wójtowicz and Mościcki, 2008). One of the interesting pretreatment methods is the ultrasound radiation used for starchy raw materials directly before extrusion process. Depending on the intensity and frequency of the ultrasonic waves it can be utilized for preparation of new and improved products as well as used to facilitate testing the quality of manufactured food products, especially in the on-line monitoring of the quality of extruded products (Owolabi et al., 2008, Awad et al., 2012).

Ultrasounds are widely studied and used in variety of food processing operations and processes like freezing, drying, sticky products cutting, meat crumbling, wine and whiskey aging, cheeses ripening, sterilization, extraction, emulsification, and many more (Soria and Villamiel, 2010, Chang et al., 2012). Effect of ultrasound is used mainly for cavitation and improves mass and heat transfer. Using ultrasounds, food processing processes can be done several times faster, with high degree of reproducibility at reduced processing costs, simplifying the operations performed and yielding a higher purity of the final product, thereby eliminating the process of treating and purifying waste water (Hromádková et al., 2003; Chemat et al., 2011; Chandrapala et al., 2012; Karkani et al., 2013).

**Abstrakt:** W pracy przedstawiono wyniki badań procesu ekstruzji nasion gryki i kukurydzy, które poddano wcześniej wstępnej obróbce ultradźwiękowej w całości i po zmieleniu. Celem badań było określenie wpływu pola akustycznego o niskiej częstotliwości 40kHz na jakość wytworzonych produktów. Wyznaczono wskaźniki ekspandowania radialnego i objętościowego oraz wskaźniki wodochłonności WAI i rozpuszczalności wodnej WSI z zastosowaniem doświadczenia z centralnym planowaniem kompozycyjnym. Dla wszystkich próbek wyznaczono również porowatość ekstrudatu. Rozkład porów został opisany poprzez średnią wielkość porów i ich liczbę na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego oraz orientację geometryczną porów. Ekstrudaty otrzymane z materiału poddanego ultradźwiękom porównano z ekstrudatami z materiału nie poddanego żadnej obróbce, otrzymując odmienne właściwości teksturalne.

**Słowa kluczowe:** ultradźwięki, ekstruzja żywności, gryka, kukurydza

### WSTĘP

Ekstruzja jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych metod wytwarzania produktów żywnościowych gotowych do spożycia oraz wielu innych wyrobów. Jest to proces, w którym mieszanina składników spożywczych przeciskana jest pod wpływem wysokiego ciśnienia przez dyszę wylotową ekstrudera. Na skutek występujących w trakcie procesu wysokich temperatur oraz sił ścinających w połączeniu z odpowiednią wilgotnością w surowcu skrobiowym zachodzą przemiany umożliwiające powstawanie zupełnie nowych produktów (Desrumaux in. 1998, Chang i in. 2001, Ekielski in., 2007a). W procesie ekstruzji stosowana jest często wstępna obróbka surowców w kondycjonerach, której celem jest zmniejszenie zużycia energii oraz poprawa jakości produktu końcowego (Ekielski i wsp., 2007b, Wójtowicz i Mościcki, 2008). Podobne korzyści może przynieść zastosowanie w procesie ekstruzji technologii ultradźwiękowej. Odpowiedni dobór mocy i częstotliwości fal ultradźwiękowych może umożliwić wytwarzanie ulepszonych lub też zupełnie nowych wyrobów ekstrudowanych. Może także umożliwić monitorowanie jakości produktów on-line (Owolabi i wsp., 2008, Awad i wsp., 2012).

Ultradźwięki są szeroko zbadane i wdrożone do produkcji w takich operacjach i procesach jak mrożenie, suszenie, krojenie lepkich produktów, kruszenie mięsa, starzenie wina i whiskey, dojrzewanie serów, sterylizacja, ekstrakcja, tworzenie emulsji i wiele innych (Chang i wsp., 2012, Soria i Villamiel, 2010). Działanie ultradźwięków znajduje zastosowanie przede wszystkim dzięki zjawisku kawitacji i polepszeniu transferu masy. Z pomocą ultradźwięków procesy przetwórstwa żywności mogą być realizowane kilkakrotnie krócej, z wysoką przetawalnością, przy jednocześnie obniżonych kosztach przetwarzania. Ich zastosowanie upraszcza wykonywane czynności i daje wyższą czystość końcowego produktu, co eliminuje obróbkę po procesie i oczyszczanie ścieków (Hromádková i wsp., 2003, Chemat i wsp., 2011, Chandrapala i wsp., 2012, Karkani i wsp., 2013).

Some studies also support the use of ultrasound in the extrusion process to improve the flow and to reduce the resistance of highly viscous and sticky material transported from the inside of the extruder and the modification of its structure. To this end, the ultrasound source was located at right angles to the cylinder to impart a radial vibration (Akbari et al., 2007). From the standpoint of extrusion process used directly on grains important effect of sonication is the degradation of the polymers, including carbohydrates. Depolymerization occurring due to cavitation phenomenon may be related to the physical collapsing of cavitation bubbles or chemical changes produced by the action of radicals on the polymer chain. Ultrasounds were tested on the starch of many different plants. The first work in this area was established in 1933. Many studies demonstrated that ultrasounds alter the rheological properties of food: disturb the arrangement of crystalline grains of maize and potato starch, the starch gelatinization, increase the water absorption capacity and the solubility of the starch grains of corn and increase wheat proteins solubility, reduce viscosity, improve foaming properties (Vinatoru et al., 1999; Jambrak and et al., 2010; Chemat et al., 2011; Zhu et al., 2012; Hernoux et al., 2013; Sujka and Jamroz, 2013).

The objective of the present investigation was to study the effect of ultrasound waves pre-treatment on extrudate properties obtained through the single screw extrusion cooking of maize and buckwheat seeds.

## MATERIALS AND METHODS

Maize (Credo varieties) and buckwheat (Luba varieties) grains which were procured from the local market have been used in the investigation. For investigation of the ultrasound effect for maize and buckwheat, the two group of raw materials have been prepared: ultrasound treated and untreated. Treated samples have been prepared as suspension in the water.

Suspension has been prepared by stirring the appropriate amount of grain (grain sample mass=5 kg) and water in 1:1 mass ratio.

### Ultrasound treatment

Separately maize-water and buckwheat-water suspension have been treated with ultrasonic waves. The ultrasound transducer has been located in the container filled with suspension. The ultrasound 40kHz generator (Inter Sonic 37P, Poland) was attached to the transducer, irradiated the 40kHz frequency waves with 60W power. Samples were treated for 20 minutes.

### Determination of ultrasound power

Ultrasonic power transmit to suspension, which is considered as mechanical energy, is partly dissipated and converted on thermal energy. Since the suspension temperature grows up, the ultrasound power is able to estimate by measurement of suspension temperature changes. The equation (1) describes this functional relationship shown below (Margulis, 2003):

$$P = m \cdot c_p \cdot \left( \frac{dT}{dt} \right); \quad (1)$$

where:  $m$  - the mass of the sonicated liquid (g),  $c_p$  - the specific heat of medium at a constant pressure dependent on composition and volume of medium ( $J/gK^1$ ),  $dT/dt$  - the slope of the suspension temperature changes in observe time curve.

Ultrasound intensity is expressed in watts per unit volume suspension. In the experiment ultrasound intensity  $P=11.5 W \cdot cm^{-3}$  was obtained.

Podjęmowano również próby zastosowania ultradźwięków przy wspomaganii procesu ekstruzji do poprawy przepływu i redukcji oporu silnie lepkiego i kleistego materiału transportowanego z wnętrza ekstrudera oraz modyfikacji jego struktury. W tym celu źródło ultradźwięków lokalizowano pod kątem prostym do cylindra, aby nadać mu promieniowe drgania (Akbari i wsp., 2007). Z punktu widzenia procesu ekstruzji stosowanej bezpośrednio na ziarna zbóż ważnym efektem działania ultradźwięków jest degradacja polimerów, w tym węglowodanów. Depolimeryzacja zachodząca na skutek zjawiska kawitacji, może być związana z fizycznym zapadaniem się pęcherzyków kawitacyjnych lub z chemicznymi zmianami spowodowanymi działaniem rodników na łańcuch polimerowy. Ultradźwięki były badane na skrobi pochodzącej z wielu różnych roślin. Pierwsza praca z tego zakresu powstała w 1933 roku. W wielu pracach dowiedziono, że ultradźwięki zmieniają właściwości reologiczne żywności: zaburzają układ krystaliczny ziaren skrobiowych kukurydzy i ziemniaka, żelatynizację skrobi, zwiększają zdolność absorpcji wody i rozpuszczalność ziaren skrobiowych kukurydzy, a także zwiększają rozpuszczalność białek pszenicy, redukują lepkość, polepszają właściwości pianotwórcze (Jambrak i wsp., 2010; Chemat i wsp., 2011, Zhu i wsp., 2012, Hernoux i wsp., 2013, Sujka i Jamroz, 2013).

Celem pracy było zbadanie wpływu działania fal ultradźwiękowych na parametry jakościowe ekstrudatów otrzymywanych z kukurydzy i gryki wytwarzanych na ekstruderze jednoślismakowym.

## MATERIAŁ I METODYKA

Podstawowym materiałem wykorzystywanym w badaniach było ziarno kukurydzy odmiany Credo oraz ziarno gryki odmiany Luba. Materiał podzielono na dwie grupy: poddane obróbce i nie poddane obróbce. Obróbka wstępna ziaren przeznaczonych do przetwarzania w procesie ekstruzji polegała na poddawaniu ich działaniu fal ultradźwiękowych. Surowiec przed obróbką ultradźwiękową został zalany wodą w stosunku 1:1, tworząc zawiesinę. Jednorazowo działaniu ultradźwięków poddawano próbkę o masie 5 kg.

### Obróbka ultradźwiękami

Ziarno kukurydzy i gryki poddano działaniu fal ultradźwiękowych o natężeniu 40 kHz za pomocą generatora ultradźwięków z przetwornikiem (Inter Sonic 37P, Poland) o mocy nominalnej 60 W umieszczonego w pojemniku z zawiesiną. Czas działania ultradźwięków wynosił 20 min.

### Określenie mocy ultradźwięków

Moc ultradźwięków podawana do zawiesiny materiału z wodą, traktowana jako energia mechaniczna, jest częściowo rozpraszana i zamieniana na energię cieplną. Ponieważ temperatura zawiesiny wzrastała moc ultradźwięków mierzono poprzez zmiany temperatury zawiesiny. Równanie (1) opisujące tę zależność funkcjonalną przedstawiono poniżej (Margulis, 2003):

gdzie:  $m$  – masa cieczy poddanej obróbce (g),  $c_p$  – ciepło właściwe czynnika przy stałym ciśnieniu w zależności od składu i ilości czynnika ( $J/gK^1$ ),  $dT/dt$  – krzywa zmian temperatury zawiesiny w danym okresie czasu.

Natężenie ultradźwięków wyrażona jest w watach na jednostkę objętości zawiesiny. W badaniach uzyskano natężenie równe  $P=11,5 W \cdot cm^{-3}$ .

### Experiment

The single 5 kg mass of corn or buckwheat grain sample before experiment was placed in the glass container filled with water in 1:1 ratio. The samples were treated for 20 minutes by the ultrasonic generator and transducer. Figure 1 shows the experimental stand for ultrasound processing.

Grains after ultrasound treatment were dried to 15% w/w (buckwheat) and 25% w/w (maize) moisture content with a drum dryer. The final moisture content was measured in moisture analyser WPS 210 (Poland). Half of the ultrasound treated material was ground in grinder RUD-216 (Poland) equipped with 20 mesh screen.

A single screw extruder KZM-2 (modified Russian one), with outer diameter of the extruder screw of 100 mm, was used. The length to diameter (L/D) ratio of the extruder was 8:1, the screw speed - 200 rpm. The extruder was provided with a temperature control facility (in two separate zones), and digital display for measuring electrical power consumption developed during extrusion. The temperature of the extruder at sections (starting from the feed end) was maintained at 80, 125 °C by fuzzy algorithm controller (Ekielski, 2006). Feeding of the raw material to the extruder was accomplished by using single screw volumetric feeder. The extrusion trials were repeated three times.

### Quality indices

**Water absorption and water solubility indices.** Water absorption (WAI) and water solubility (WSI) indices were determined by the method of Anderson et al. (1969). The extrudates were first milled to a mean size of 180-250 µm. A 2.5g sample was dispersed in 25 ml of distilled water. The plastic stem had been used to break up any lumps, next start to stir for 20 minutes. Four dispersion samples were rinsed into centrifuge pockets and then centrifuged at 4500 rpm for 15 minutes. The supernatant was decanted for determination of its solids content and sediment was weighted. Collected supernatant had been dried in 105°C in laboratory dryer for 24 hours. The residues solids had been weighted on the precision electronic scale, mass determined with 0,001 g accuracy. WAI and WSI were calculated from the equations (2) and (3):

$$WAI = \frac{m_o}{m_e} \cdot 100[-] \quad (2)$$

$$WSI = \frac{m_n}{m_e} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

where:  $m_o$  - mass of sediment,  $m_e$  - mass of dry solids (mass of dry milled extrudate),  $m_n$  - mass of dissolved solids in supernatant.

### The inner structure of extrudate

Porosity tests were performed on the test image analysis with a light chamber equipped with fluorescent light TL-D DeLuxe Pro 18 W/965 (Philips manufactured) with color emitted temperature 6500K, presented the color index  $R_a=90\%$ . Images have been taken by CCD camera (model FD30, Hitachi) and grabber image software saved the pictures on computer HDD. The pictures saved in TIFF format were treated and analysed by National Instrument NI Vision 7.1.1 software. Porosity was determined for using the method described by Gosselin and Rodrigue (2005) where an irregular boundary for the analyzed group of air pores in cut view, was used.

Color cut view images obtained during experiment were then transposed to the monochrome color space. The resulting images 8-byte grayscale (256 levels) in next step were converted to binary bitmaps. The threshold T transformations were selected automatically as the result of the function (4):

### Przebieg badań

Przed rozpoczęciem eksperymentu każdą próbę surowca o masie 5 kg kukurydzy lub gryki umieszczano w szklanym pojemniku z wodą w stosunku 1:1. Następnie próbki poddawano obróbce ultradźwiękowej przez okres 20 minut.

Ziarna po obróbce ultradźwiękowej suszono w suszarce bębnowej do wilgotności 15% (gryka) i 25% (kukurydza). Wilgotność końcową mierzono w wagosuszarce WPS 210 (Polska). Połowa materiału po obróbce była mielona w rozdrabniaczu RUD-216 (Polska), i przesiewana na sicie o oczkach 20 mesh.

Następnie materiał ekstrudowano na ekstruderze jednoślismakowym KZM-2 (modyfikacja rosyjskiego ekstrudera), o średnicy zewnętrznej ślimaka 100 mm. Stosunek długości do średnicy (L/D) wylączarki wynosił 8:1, prędkość obrotowa ślimaka wynosiła 200 obr. min<sup>-1</sup>. Wylączarka była wyposażona w regulator temperatury (w dwóch oddzielnych strefach) oraz cyfrowy miernik z wyświetlaczem zużycia energii elektrycznej w trakcie wylączania. Temperaturę wylączarki w sekcjach (licząc od końca zasilającego) utrzymywano na poziomie 80°C i 125°C z użyciem regulatora ustawionego za pomocą algorytmu rozmytego (Ekielski, 2006). Podawanie surowca do wylączarki zachodziło przy użyciu jednoślismakowego podajnika objętościowego. Próby wykonano w 3 powtórzeniach.

### Wskaźniki jakościowe

**Wskaźniki wodochłonności WAI i rozpuszczalności WSI.** Wodochłonność i rozpuszczalność określano metodą Andersona i wsp. (1969). Metoda pomiaru polegała na wymieszaniu 2,5 g rozdrobnionego ekstrudatu (wielkość cząsteczek 180-250 µm) w 25 ml destylowanej wody i oddzieleniu nadmiaru wody od osadu po upływie 20 minut poprzez odwirowanie w wirówce przy prędkości obrotowej 4500 obr. min<sup>-1</sup> przez 15 min. Uzyskany w ten sposób nadsącz zlewano na płytki Petriego i suszono w temperaturze 105°C przez 24 godz. Odsączoną próbkę ważono na wadze elektronicznej z dokładnością 0,001g. Współczynniki WAI i WSI obliczono z zastosowaniem poniższych równań (2) i (3):

$$WAI = \frac{m_o}{m_e} \cdot 100[-] \quad (2)$$

$$WSI = \frac{m_n}{m_e} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

gdzie:  $m_o$  - masa nasączonej próbki,  $m_e$  - masa suchej próbki (masa suchego rozdrobnionego ekstrudatu),  $m_n$  - masa wysuszonego nadsączu.

### Struktura wewnętrzna ekstrudatu

Badania porowatości wykonano na stanowisku badawczym do analizy obrazu z komorą świetlną wyposażoną w świetlówki światła dziennego TL - D De Luxe Pro 18W/965 o temperaturze barwowej 6500 K i współczynniku odwzorowywania barw  $R_a - 90\%$  firmy Philips oraz kamerę CCD KP - FD30 firmy HITACHI i oprogramowanie do analizy zdjęć. Zdjęcia zapisywano w formacie TIF. Porowatość określano według metody Gosselin i Rodrigue (2005) stosując nieregularną obwiednię analizowanej grupy porów powietrznych na analizowanych zdjęciach. Do analizy zdjęć zastosowano program firmy National Instrument NI Vision 7.1.1. Uzyskane kolorowe zdjęcia transponowano do przestrzeni monochromatycznej.

Otrzymane obrazy o 8-bajtowej skali szarości (256 odcieni) przekształcano w dwuwartościowe mapy bitowe. Wartość progową T przekształcenia dobierano automatycznie jako wynik funkcji (4):



$$T = su_p \{A_T\} \quad (4)$$

where:  $A_T$  – presented the set values for the number of pore recognized, for the threshold values equal  $T \in \langle 0-255 \rangle$ . After calculating the value of  $T$ , set the number of pore per unit area [ $\text{cm}^2$ ] and the average pore size were counted.

### Physical extrudate properties

**Expansion indexes.** The sectional, volumetric indexes of the extrudates were assigned according to the methods developed by Alvarez Martinez et al. (1988).

The sectional expansion (SEI) was calculated by dividing the cross-sectional areas of the extrudates ( $S_e$ ) by the cross sectional of the die opening ( $S_d$ ). The volumetric expansion index (VEI) is the apparent raw material density ( $\rho_m$ ) to apparent extrudate density after expansion ( $\rho_e$ ). Expansion indexes were expressed as (5) and (6):

$$SEI = \frac{S_e}{S_d} \quad (5)$$

$$VEI = \frac{\rho_m (1 - MC_m)}{\rho_e (1 - MC_e)} \quad (6)$$

where:

$MC_m$  and  $MC_e$  are the moisture contents of the raw material before extrusion proces, and moisture content of the extrudates, respectively.

**Apparent extrudate density.** The expanded extrudate density ( $\rho_e$ ) was calculated as the mass of extrudate sample ( $m_e$ ) is divided by the equivalent volume of extrudates ( $V_e$ ). The sample was weighted on the laboratory scale (RADWAG WPS 300) with an accuracy of 0.001g. The volume of extrudates ( $V_e$ ) was determined with water displacement method developed by Ekielski (Ekielski and Osiak 2003). The extrudate sample was immersed in container filled with rapeseed oil to impregnate. After removing the samples from the oil container, the extrudate was dried of excess oil and immersed into the tank filled with water. The water volume increase was read from the scale on the side of the vessel.

### Statistical analysis

The experiments were designed using standard design (SD)  $2^{**}(2-0)$  with selectivity  $R=Full$  (three repetitions). Standard design comprising two independent processing parameters at two different levels. SD was chosen for designing the experiments, because it is a correct tool for optimization and it also reduces the number of experiments. Data were analysed using DOE module, SD design in the Statistica 10 program (table 1).

gdzie:  $A_T$  – zbiór przedstawiający wartości liczby rozpoznawalnych por dla wartości progowej  $T \in \langle 0-255 \rangle$ . Po obliczeniu wartości  $T$  wyznaczono liczbę por na jednostkę powierzchni [ $\text{cm}^2$ ] oraz średni rozmiar por.

### Właściwości fizyczne ekstrudatów

**Wskaźniki ekspansji.** Wskaźniki ekspandowania objętościowego i radialnego obliczono według poniższych wzorów (Alvarez-Martinez i wsp. 1988).

Wskaźnik ekspandowania radialnego (SEI) był obliczany jako stosunek przekroju ekstrudatu ( $S_e$ ) do pola przekroju poprzecznego otworu matrycy ( $S_d$ ). Wskaźnik ekspansji objętościowej (VEI) obliczano jkako stosunek gęstości materiału wejściowego ( $\rho_m$ ) do gęstości ekstrudatu ( $\rho_e$ ). Indeksy ekspansji wyrażono jako (5) i (6):

$$SEI = \frac{S_e}{S_d} \quad (5)$$

$$VEI = \frac{\rho_m (1 - MC_m)}{\rho_e (1 - MC_e)} \quad (6)$$

gdzie:

$MC_m$  i  $MC_e$  to odpowiednio zawartość wilgoci w suchym materiale przed ekstruzją i zawartość wilgoci w ekstrudacie.

**Gęstość ekstrudatu.** Gęstość ekstrudatu ( $\rho_e$ ) obliczono jako stosunek masy eukstrudatu ( $m_e$ ) do objętości ekstrudatu ( $V_e$ ). Próbkę ważono na wadze laboratoryjnej firmy RADWAG WPS 300 z dokładnością 0,001g. Objętość ekstrudatu ( $V_e$ ) określono metodą wypornościową opracowaną przez Ekielskiego (Ekielski i Osiak, 2003). Próbka ekstrudatu zanurzana była w pojemniku wypełnionym olejem rzepakowym do impregnacji. Po usunięciu próbki ze zbiornika oleju, ekstrudat odsączano z nadmiaru oleju i zanurzano w zbiorniku z wodą. Następnie odczytywano objętość wody. Różnica objętości wody odpowiadała mierzonej objętości ekstrudatu.

### Analiza statystyczna

W badaniach zastosowano plan standardowy  $2^{**}(2-0)$  o rozdzielczości  $R=FULL$  z trzema powtórzeniami o oliczbie wielkości wejściowych dwa na dwóch różnych poziomach. W celu poprawnego przeprowadzenia eksperymentu (SD - standard design) wielkości wejściowe sprowadzono do wartości liczbowej. Dane poddano analizie w programie Statistica 10 z wykorzystaniem modułu planowania doświadczeń DOE (tab.1).

Table 1

Treatment coded and the plan of experiments generated by standard design (SD) in Statistica 10

| Seed                         | Treated by                       | Code                             |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                              | non-ground seeds (whole seed)    | -1                               |
| ground seeds                 | 1                                |                                  |
| 40 kHz ultrasound treated    | -1                               |                                  |
| without ultrasound treatment | 1                                |                                  |
| Rep.                         | Mechanical treated material code | Ultrasound treated material code |
| 1                            | -1                               | -1                               |
| 1                            | 1                                | -1                               |
| 1                            | -1                               | 1                                |
| 1                            | 1                                | 1                                |
| 2                            | -1                               | -1                               |
| 2                            | 1                                | -1                               |
| 2                            | -1                               | 1                                |
| 2                            | 1                                | 1                                |
| 3                            | -1                               | -1                               |
| 3                            | 1                                | -1                               |
| 3                            | -1                               | 1                                |
| 3                            | 1                                | 1                                |

To determine the significance of the quality parameters extrudates ANOVA variance analysis was applied.

## RESULTS

The influence of ultrasonic pretreatment on the quality parameters of corn and buckwheat extrudate indicates that ultrasound treatment results in qualitative changes in the products obtained. This relationship was confirmed by the results of empirical research and statistical significance tests carried out for each of the extrudate quality parameters (tab. 2). When one had looked on the results shown, it should be noted that in some cases the results of significance test for corn and buckwheat clearly differ, which might be primarily due to the different chemical composition of these materials, as well as the various physical characteristics of whole seeds undergoing a process of extrusion. Particular attention had been paid to WAI parameter, where statistical analysis clearly shows the importance of changes in both the corn and buckwheat extrudate.

The obtained experiment results during testing of influence of ultrasonic treatment on the corn and buckwheat extrudate quality parameters are shown in Figures (1-6). Analyzing the graph (figure 1), it can be observed that the water absorption (WAI) extrudates varied depending on the method of pretreatment. The values of this index were the highest (5.60 - corn and 5.23 - buckwheat) for extrudates obtained from whole grains and treated with ultrasound. In the case of grounded grains and subjected to ultrasonic treatment were lower WAI values for extrudates obtained from whole grains. Extrudates obtained from untreated material were characterized by ultrasound and the lowest water absorption and WAI values ranged from 5.04 to 4.66 for buckwheat and corn.

Istotność parametrów jakościowych ekstrudatów określono z wykorzystaniem analizy wariancji ANOVA.

## WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań wpływu obróbki ultradźwiękowej na parametry jakościowe ekstrudatu kukurydzianego i gryczanego wskazują, że fale ultradźwiękowe powodują zmiany jakościowe uzyskiwanych produktów. Zależność tą potwierdzają zarówno wyniki badań empirycznych, jak i statystyczne testy istotności przeprowadzone dla poszczególnych parametrów jakościowych ekstrudowanych wyrobów (tab. 2). Należy zwrócić uwagę, że wyniki testu istotności dla kukurydzy i gryki w niektórych przypadkach wyraźnie się różnią, co może wynikać głównie z różnego składu chemicznego tych surowców, jak również z różnych cech fizycznych całych ziaren poddawanych procesowi ekstruzji. Szczególną uwagę zwraca parametr WAI, gdzie analiza statystyczna wyraźnie wskazuje na istotność zmian zarówno w ekstrudacie kukurydzianym, jak i gryczanym.

Wyniki badań wpływu obróbki ultradźwiękowej na parametry jakościowe ekstrudatu kukurydzianego i gryczanego przedstawiono na rysunkach (1-6). Analizując wykres (rys. 1) można zaobserwować, że wodochłonność surowca (WAI) zarówno dla kukurydzy, jak i gryki jest największa (5,60 – kukurydza i 5,23 – gryka) dla ekstrudatów uzyskanych z całych ziaren oraz poddanych działaniu ultradźwięków. W przypadku ziaren poddanych obróbce ultradźwiękowej oraz rozdrobnionych wartości WAI były mniejsze w stosunku do ekstrudatów uzyskanych z całych ziaren. Ziarna niepoddane obróbce ultradźwiękowej odznaczały się natomiast najmniejszą wodochłonnością pomiędzy 5,04 to 4,66 dla gryki i kukurydzy.

Table 2

ANOVA variance analysis results

|   | Maize                              |    |        |          |   | Buckwheat                          |    |                 |           |         |
|---|------------------------------------|----|--------|----------|---|------------------------------------|----|-----------------|-----------|---------|
|   | Volume expansion indices (VEI) [-] |    |        |          |   | Volume expansion indices (VEI) [-] |    |                 |           |         |
|   | SS                                 | df | MS     | F        | p   | SS                                 | df | MS              | F         | p       |
| Ground (1)                                | 0.0179                             | 1  | 0.0179 | 13.2762* | 0.0066                                    | 0.2809                             | 1  | 0.2809          | 0.7672    | 0.4066  |
| Ultrasound treated (2)                    | 0.0514                             | 1  | 0.0514 | 38.1771* | 0.0003                                    | 0.0390                             | 1  | 0.0390          | 0.1066    | 0.7524  |
| 1 vs. 2                                   | 0.0212                             | 1  | 0.0212 | 15.7945* | 0.0041                                    | 0.1273                             | 1  | 0.1273          | 0.3477    | 0.5717  |
| Error                                     | 0.0108                             | 8  | 0.0013 |          |   | 2.9293                             | 8  | 0.3662          |           |         |
| Overall SS                                | 0.1012                             | 11 |        |          |   | 3.3766                             | 11 |                 |           |         |
| The sectional expansion indices (SEI) [-] |                                    |    |        |          | The sectional expansion indices (SEI) [-] |                                    |    |                 |           |         |
| Ground (1)                                | 0.0068                             | 1  | 0.0068 | 0.1054   | 0.7538                                    | 0.0578                             | 1  | 0.0578          | 0.6255    | 0.4518  |
| Ultrasound treated (2)                    | 0.2137                             | 1  | 0.2137 | 3.2968   | 0.1070                                    | 0.4972                             | 1  | 0.4972          | 5.3841*   | 0.0489  |
| 1 vs. 2                                   | 0.0440                             | 1  | 0.0440 | 0.6782   | 0.4341                                    | 0.0202                             | 1  | 0.0202          | 0.2189    | 0.6524  |
| Error                                     | 0.5185                             | 8  | 0.0648 |          |   | 0.7387                             | 8  | 0.0923 / 0.0923 |           |         |
| Overall SS                                | 0.7829                             | 11 |        |          |   | 1.3138                             | 11 |                 |           |         |
| WAI [-]                                   |                                    |    |        |          | WAI [-]                                   |                                    |    |                 |           |         |
| Ground (1)                                | 0.3624                             | 1  | 0.3624 | 19.6290* | 0.0022                                    | 0.1007                             | 1  | 0.1007          | 112.8312* | 0.00005 |
| Ultrasound treated (2)                    | 0.9307                             | 1  | 0.9307 | 50.4122* | 0.0001                                    | 0.0822                             | 1  | 0.0822          | 92.1038*  | 0.00001 |
| 1 vs. 2                                   | 0.3624                             | 1  | 0.3624 | 19.6290* | 0.0022                                    | 0.1281                             | 1  | 0.1281          | 143.6149  | 0.00002 |
| Error                                     | 0.1477                             | 8  | 0.0185 |          |   | 0.0071                             | 8  | 0.0009          |           |         |
| Overall SS                                | 1.8032                             | 11 |        |          |   | 0.3181                             | 11 |                 |           |         |
| WSI [%]                                   |                                    |    |        |          | WSI [%]                                   |                                    |    |                 |           |         |
| Ground (1)                                | 5.2260                             | 1  | 5.2260 | 25.3445* | 0.0010                                    | 0.4019                             | 1  | 0.4019          | 0.19654   | 0.6693  |
| Ultrasound treated (2)                    | 0.5931                             | 1  | 0.5931 | 2.87623  | 0.1283                                    | 0.0216                             | 1  | 0.0216          | 0.01054   | 0.9208  |
| 1 vs. 2                                   | 5.2260                             | 1  | 5.2260 | 25.3445* | 0.0010                                    | 0.1192                             | 1  | 0.1192          | 0.0583    | 0.8153  |
| Error                                     | 1.6496                             | 8  | 0.2062 |          |   | 16.3575                            | 8  | 2.0447          |           |         |
| Overall SS                                | 12.6947                            | 11 |        |          |   | 16.9001                            | 11 |                 |           |         |

|                        | Porosity [amount pores in cm <sup>2</sup> ] |    |          |          |        | Porosity [amount pores in cm <sup>2</sup> ] |    |         |         |        |
|------------------------|---|----|----------|----------|--------|---|----|---------|---------|--------|
| Ground (1)             | 310.083                                     | 1  | 310.0833 | 9.81794* | 0.0139 | 20.0208                                     | 1  | 20.0208 | 4.9031  | 0.0577 |
| Ultrasound treated (2) | 444.083                                     | 1  | 444.0833 | 14.0607* | 0.0056 | 25.5208                                     | 1  | 25.5208 | 6.2500* | 0.0369 |
| 1 vs. 2                | 374.083                                     | 1  | 374.0833 | 11.8443* | 0.0088 | 35.0208                                     | 1  | 35.0208 | 8.5765* | 0.0190 |
| Error                  | 252.667                                     | 8  | 31.5833  |          |        | 32.6667                                     | 8  | 4.0833  |         |        |
| Overall SS             | 1380.92                                     | 11 |          |          |        | 113.2292                                    | 11 |         |         |        |
|                        | Average of size pores [mm <sup>2</sup> ]    |    |          |          |        | Average of size pores [mm <sup>2</sup> ]    |    |         |         |        |
| Ground (1)             | 0.0050                                      | 1  | 0.0050   | 0.0444   | 0.8383 | 20.0208                                     | 1  | 20.0208 | 4.9031  | 0.0577 |
| Ultrasound treated (2) | 0.0760                                      | 1  | 0.0760   | 0.6765   | 0.4346 | 25.5208                                     | 1  | 25.5208 | 6.2500* | 0.0369 |
| 1 vs. 2                | 0.0012                                      | 1  | 0.0012   | 0.0107   | 0.9201 | 35.0208                                     | 1  | 35.0208 | 8.5765* | 0.0190 |
| Error                  | 0.8984                                      | 8  | 0.1123   |          |        | 32.6667                                     | 8  | 4.0833  |         |        |
| Overall SS             | 0.9806                                      | 11 |          |          |        | 113.2292                                    | 11 |         |         |        |

\* - significant at 5% ( $p \leq 0,05$ )

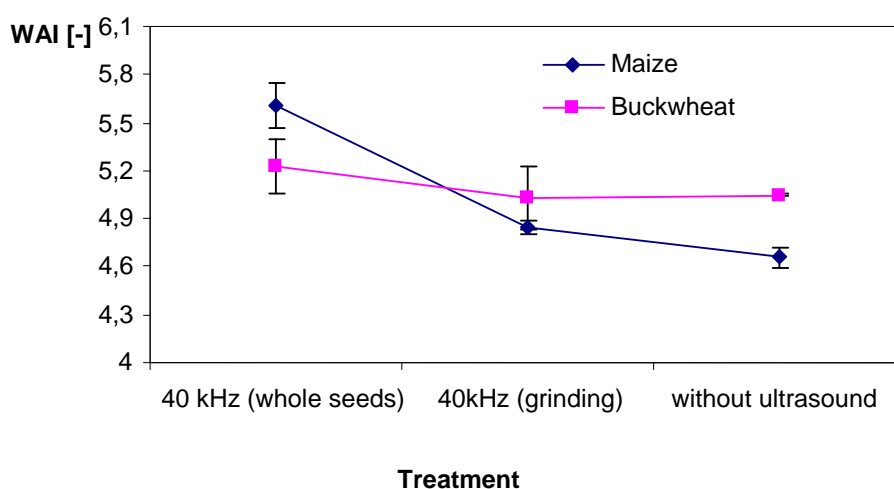


Fig. 1 - The water absorption indices (WAI) changes for corn and buckwheat extrudates according to material pre-treatment

Analyzing figure 2 showing WSI parameter change, it can be observed that the course of the graph is reversed in relation to the WAI graph. The highest values for WSI amounting 22.63% were recorded for buckwheat extrudate obtained from raw material without ultrasonic pre-treatment. In the case of corn extrudate similar trend was also observed. This course of the graph can indicate that the degradation of the extrudate due to the conditions prevailing in the cylinder of the extruder was the highest. Increased degradation of starch, in turn, could be caused by an uncontrolled increase of shear and temperature of the extruder barrel as a result of the processing of grain with intact cell structure. According to Mason and Zhao (1994) and Kobus (2006) ultrasonic waves can disrupt plant cells. According to the authors, the cell content is released into the extraction solvent. Such a phenomenon occurs mainly in products with a high degree of hydration. Such a statement may be grounds to believe that the phenomenon took place in the case of raw materials subjected to sonication and led to a decrease in solubility.

Analizując wykres (rys. 2) przedstawiający zmiany wartości parametru WSI można zaobserwować, że przebieg wykresu jest odwrotny w stosunku do wykresu WAI. Największe wartości parametru WSI dla ekstrudatu (22,63%) uzyskanego z surowca niepoddanego działaniu ultradźwięków (gryka) mogą wskazywać, że degradacja ekstrudatu na skutek warunków panujących w cylindrze ekstrudera była największa. Mogło to być z kolei wynikiem niekontrolowanego zwiększenia sił ścinających i temperatury w cylindrze ekstrudera na skutek przetwarzania ziarna z nienaruszoną strukturą komórkową. Według Mason i Zhao (1994) i Kobus (2006) fale ultradźwiękowe mogą rozrywać komórki roślinne. Według autorów zawartość komórek uwalniana jest do rozpuszczalnika ekstrakcyjnego. Takie zjawisko zachodzi głównie w produktach o dużym stopniu uwodnienia. Stwierdzenie to może dać podstawy do podejrzeń, że zjawisko takie miało miejsce w przypadku surowców, które poddano działaniu ultradźwięków i doprowadziło do spadku rozpuszczalności.

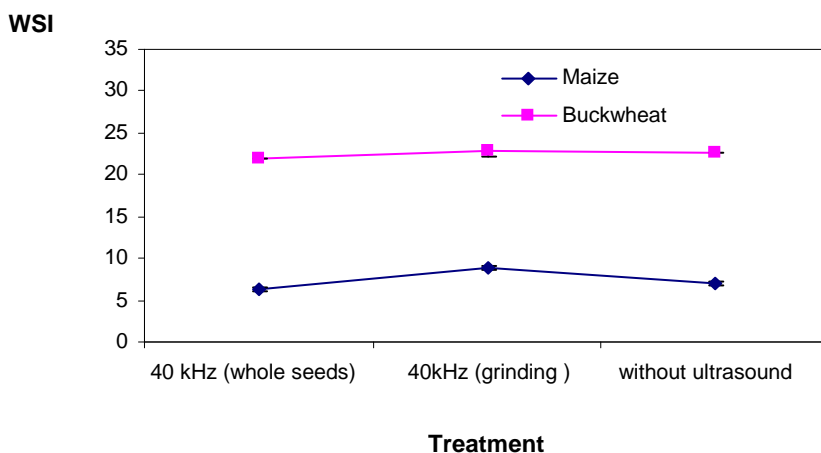


Fig. 2 - The water solubility indices (WSI) changes for corn and buckwheat extrudates according to material pretreatment

The qualitative parameter, which undergoes significant changes as a result of sonication was also extrudate porosity and average pore size measured on the surface of the extrudate cross-section. It was found that the porosity was the highest in the case of extrudates obtained from whole grains treated with ultrasound and time - 66.33 pores in  $\text{cm}^{-2}$  for corn and 42.33 pores in  $\text{cm}^{-2}$  for buckwheat. The lowest porosity characterized grounded while extrudates treated with ultrasound and extrudates obtained from whole grains and roasted effect of ultrasonic waves, reaches values are: 40.66 - 42.33 pores in  $\text{cm}^{-2}$  for both extrudated researched (Figure 3). According to Lanuay et al, (1983), Ekielski and Żelaziński (2012), the high porosity is usually a positive attribute of extruded materials and can provide a high homogeneity of the sample. Low porosity can be translated on the formation of large pores of irregular shape. The Figure 4 shows the variation in average pore size in the examined extrudates. The diagram of buckwheat treated with ultrasound can point to such a relationship.

Parametrem jakościowym, który ulegał istotnym zmianom na skutek działania ultradźwięków była również porowatość ekstrudatu oraz średni rozmiar por ekstrudatu mierzony na powierzchni jego przekroju poprzecznego. Stwierdzono, że porowatość była największa w przypadku ekstrudatów uzyskanych z całych ziaren poddanych działaniu ultradźwięków – 66,33 pory w  $\text{cm}^2$  dla kukurydzy i 42,33 pory w  $\text{cm}^2$  dla gryki. Taką tendencję można zaobserwować zarówno dla ekstrudatów kukurydzianych, jak i gryczanych. Najmniejszą porowatością charakteryzowały się natomiast ekstrudaty niepoddane działaniu fal ultradźwiękowych (rys. 3). Według badań Lanuay i wsp. (1983), Ekielskiego i Żelazińskiego (2012) wysoka porowatość jest zwykle cechą pozytywną dla ekstrudowanych surowców i może świadczyć o dużej jednorodności próbki. Niska porowatość może się natomiast przekładać na powstawanie dużych porów o nieregularnym kształcie. Na wykresie (rys. 4) przedstawiono zmiany średniego rozmiaru por w ekstrudatach poddanych badaniom. Przebieg wykresu gryki poddanej działaniu ultradźwięków może wskazywać na taką zależność.

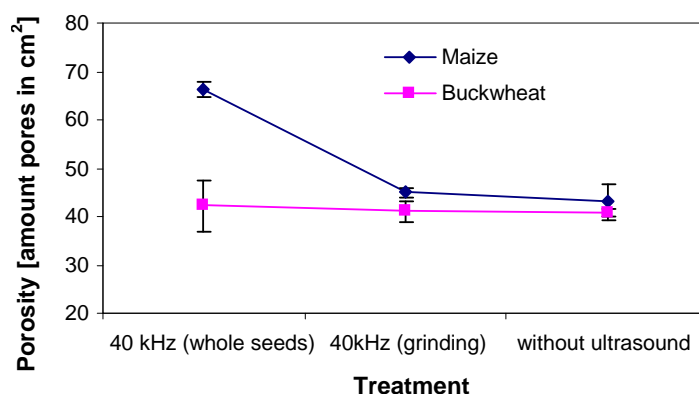


Fig. 3 - The porosity indices changes for corn and buckwheat extrudates according to material pre-treatment

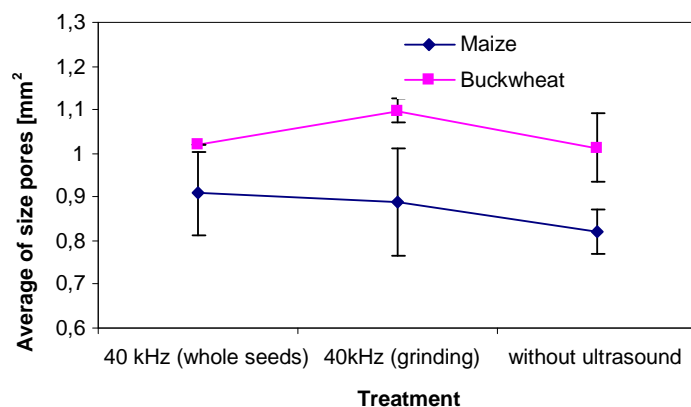


Fig. 4 - The porosity indices changes for corn and buckwheat extrudates according to material pre-treatment

The volume expansion index (VEI) and sectional expansion index (SEI) shown only a slight change in the values of these indicators (Fig. 5 and 6). It should be noted, however, that the tendency of the changes, as in the case of a WAI or porosity decrease also. The smallest values volumetric expansion indices of the samples obtained were characterized with whole grains treated with ultrasonic waves. In the case of a sectional expansion ratio small differences also appear, however, the trend shown on the chart in comparison to the volume expansion ratio is reversed.

Badania stopnia ekspandowania objętościowego i radialnego (SEI) wskazują tylko na niewielkie zmiany wartości tych wskaźników (rys. 5 i 6). Należy jednak zaznaczyć, że najmniejszymi wartościami EO tego parametru zarówno dla gryki i kukurydzy (całe ziarna poddane falam ultradźwiękowym) natomiast największymi głównie kukurydza niepoddana działaniu ultradźwięków. W przypadku Ekspansji radialnej różnice również wydają się niewielkie jednakże tendencja przebiegu wykresu w porównaniu do ekspansji objętościowej jest odwrotna.

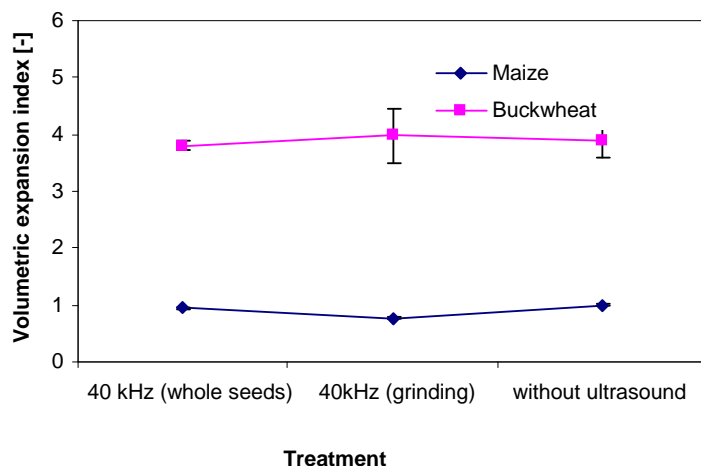


Fig. 5 - The volume expansion indices (VEI) changes for corn and buckwheat extrudates according to material pre-treatment

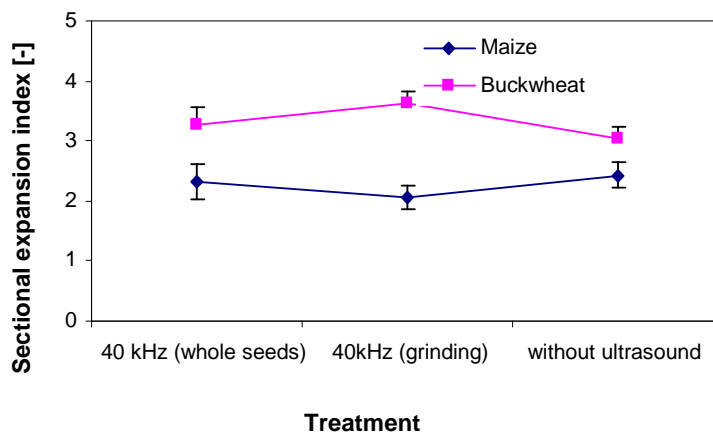


Fig. 6 - The sectional expansion indices (SEI) changes for corn and buckwheat extrudates according to material pre-treatment /



## CONCLUSIONS

In conclusion, it should be noted that the effect of 40kHz ultrasonic waves can contribute to improving the quality of extrudates, both corn and buckwheat. It is called for high values of the WAI and WSI also low, indicating a high degree of gelation of starch and, at the same time, low degree in comparison to other materials used in the study of WSI, the high porosity of the extrudates which can continue to provide a high sensory qualities of such materials (Lui and Peng (2005) and Desrumaux et al., (1998) Lanuay et al., (1983), Żelaziński and Ekielski, 2011) and slightly progressive changes in the indices of volume and sectional expansion. This may be a positive feature of such behavior of these indicators because the indicators value often depends on eg. the shape of the products themselves.

When using a raw material treated with ultrasound may not be necessary to reprogram extruder's control systems to produce the same product as the native material. This may, however, require a number of additional tests using other types of extruders.

## REFERENCES

- [1]. Akbari Mousavi S. A. A, Feizi H., Madoliat R. (2007) - *Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process*. Journal of Materials Processing Technology, 187–188, 657–661;
- [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]. Anderson R. A., Conway H. F., Pfeifer V. F., Griffin E. L. (1969) - *Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits*. Cereal Science Today, 14, 372-375, 381;
- [4]. Awad T. S., Moharram H. A., Shaltout O. E., Asker D., Youssef M. M. (2012) - *Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food. A review*. Food Research International, 48, 410–427;
- [5]. Chandrapala J., Oliver C., Kentish S., Ashokkumar M. (2012) - *Ultrasonics in food processing*. Ultrasonics Sonochemistry, 19, 975–983;
- [6]. Chang H.-J., Xu X.-L., Zhou G.-H., Li C.-B., Huang M. (2012) - *Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing*. Food and Bioprocess Technology, 5 (1), 285–297.
- [7]. Chang M., Peng J.-C., Wei K. (2001) - *The study of optimum conditions of die diameter and buckwheat content for the development of extruded corn food*. Mechanical Engineering, 10 (1-4), 43-57;
- [8]. Chemat F., Huma Z., Khan M. K. (2011) - *Applications of ultrasound in food technology. Processing, preservation and extraction*. Ultrasonics Sonochemistry, 18, 813–835;
- [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), 857-863;
- [10]. Ekielski A. (2006) - *Use of fuzzy c in optimization of operation of a line for extrusion of plant products*. Inżynieria Rolnicza. Nr 7 (82). s. 145-153;
- [11]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T. (2007a) - *Effect of extrusion conditions on physical properties of buckwheat–maize blend extrudate*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 57-61;
- [12]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T. (2007b) - *Effect of die hole diameter in the extruder on energy consumption and quality indices of maize-buckwheat extrudate*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 53-56;

## WNIOSKI

Podsumowując należy zaznaczyć, że działanie fal ultradźwiękowych 40kHz może przyczynić się do poprawy jakości ekstrudatów, zarówno kukurydzianych i gryczanych. Przemawiają za tym wysokie wartości WAI, a zarazem niskie wartości WSI, co świadczy o wysokim stopniu żelifikowania skrobi. Niewielkie wartości parametru WSI i wysoka porowatość, a także w niewielkim stopniu postępujące zmiany wskaźników stopnia ekspandowania objętościowego i radialnego ekstrudatów, mogą świadczyć o wysokich walorach sensorycznych takich produktów (Żelaziński i Ekielski, 2011, Lui i Peng, 2005, Desrumaux i wsp., 1998, Lanuay i wsp., 1983). Może być to cecha pozytywna takiego zachowania się analizowanych wskaźników, ponieważ od ich wartości zależy często np. kształt samych produktów.

Przy zastosowaniu surowców poddanych działaniu ultradźwięków być może nie będzie potrzebne przeprogramowanie ekstruderów w celu uzyskania takiego samego produktu, jak z surowca natywnego. Wymagać to może jednak wielu dodatkowych prób z wykorzystaniem innych typów ekstruderów.

## LITERATURA

- [1]. Akbari Mousavi S. A. A, Feizi H., Madoliat R. (2007) – *Badania nad wpływem drgań ultradźwiękowych w procesie wytłaczania*. Journal of Materials Processing Technology, 187–188, 657–661;
- [2]. Alvarez-Martinez L., Kondury K. P., Harper J. M. (1988) – *Ogólny model ekspansji wyrobów ekstrudowanych*. Journal of Food Science, 53, 609-615;
- [3]. Anderson R. A., Conway H. F., Pfeifer V. F., Griffin E. L., (1969) – *Ekstruzyjne gotowanie i walcowanie rozdrobnionego ziarna sorgo*. Cereal Science Today, 14, 372-375, 381;
- [4]. Awad T. S., Moharram H. A., Shaltout O. E., Asker D., Youssef M. M. (2012) – *Zastosowanie ultradźwięków w analizie, przetwarzaniu i kontroli jakości żywności. A review*. Food Research International, 48, 410–427;
- [5]. Chandrapala J., Oliver C., Kentish S., Ashokkumar M. (2012) – *Ultradźwięki w przetwórstwie żywności*. Ultrasonics Sonochemistry, 19, 975–983;
- [6]. Chang H.-J., Xu X.-L., Zhou G.-H., Li C.-B., Huang M. (2012) – *Wpływ charakterystycznych zmian kolagenu na właściwości fizykochemiczne mięsa wołowego z mięśnia półścięgnistego podczas obróbki ultradźwiękami*. Food and Bioprocess Technology 5 (1), 285–297;
- [7]. Chang M., Peng J.-C., Wei K. (2001) – *Badanie optymalnych parametrów średnicy dyszy i zawartości gryki na rozwój kukurydzianej żywności ekstrudowanej*. Mechanical Engineering, 10 (1-4), 43-57;
- [8]. Chemat F., Huma Z., Khan M.K. (2011) – *Zastosowanie ultradźwięków w technologii żywności. Przetwarzanie, konserwowanie i ekstrakcja*. Ultrasonics Sonochemistry, 18, 813–835;
- [9]. Desrumaux A., Bouvier J. M., Burri J., (1998) – *Wpływ wielkości i rozkładu cząstek kaszy kukurydzianej na charakterystykę ekstrudatów*. Journal of Food Science Engineering Processing, 63 (5), 857-863;
- [10]. Ekielski A. (2006) - *Wykorzystanie sterowników rozmytych do optymalizacji pracy linii do ekstrudowania produktów roślinnych*. Inżynieria Rolnicza. Nr 7 (82). s. 145-153;
- [11]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T. (2007a) – *Wpływ parametrów ekstruzji na właściwości fizyczne ekstrudatów z mieszanki gryka-kukurydza*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 57-61;
- [12]. Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T. (2007b) – *Wpływ średnicy otworu dyszy ekstrudera na zużycie energii i wskaźniki jakościowe ekstrudatów kukurydzino-gryczanych*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 57, 2(A), 53-56;

- [13]. Ekielski A., Osiak J. (2003) - *The effect of extruder wear parts on selected parameters of extrusion process*. Inżynieria Rolnicza, 7(49), 39-46;
- [14]. Ekielski A., Żelaziński T. (2012) - *Influence of porosity on textural properties of wheat extrudates*. Inżynieria Rolnicza, 3 (138), 35-42;
- [15]. Gosselin R., Rodrigue D. (2005) - *Cell morphology analysis of density polymer foams*. Polymer Testing, 24, 1027-1035;
- [16]. Hernoux A., Léveque J., Lassi U., Molina-Boisseaud S., Maraisd M. (2013) - *Conversion of a non-water soluble potato starch waste into reducing sugars under non-conventional technologies*. Carbohydrate Polymers, 92, 2065–2074;
- [17]. Hromádková Z., Ebringerová A. (2003) - *Ultrasonic extraction of plant materials—investigation of hemicellulose release from buckwheat hulls*. Ultrasonics Sonochemistry, 10, 127–133;
- [18]. Jambrak A. R., Herceg Z., Šubarić D., Babić J., Brnčić M., Brnčić S.R., Bosiljkov T., Čvek D., Tripalo B., Gelo J. (2010) - *Ultrasound effect on physical properties of corn starch*. Carbohydrate Polymers, 79, 91–100;
- [19]. Karkani O. A., Nenadis N., Nikiforidis C. V., Kiosseoglou V. (2013) - *Effect of recovery methods on the oxidative and physical stability of oil body emulsions*. Food Chemistry, 139, 640–648;
- [20]. Kobus Z. (2006) - *Temperature Changes of carrot pulp during Sonification*. Inżynieria Rolnicza, 7 (82), 255-261;
- [21]. 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), 259–280;
- [22]. Lui W.-B., Peng J. (2005) - *Effects of operating conditions on degradable cushioning extrudate's cellular structure and the specific heat*. Journal of Food Engineering, 70 (2), 171–182;
- [23]. Margulis M. A., Margulis I. M. (2003) - *Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid*. Ultrasonic Sonochemistry, 10, 343–345.
- [24]. Mason T. J., Zhao Y. (1994) - *Enhanced extraction of tea solids using ultrasound*. Ultrasonics, 32, 375-377;
- [25]. Owolabi G. M., Bassim M. N., Page J. H., Scanlon M. G. (2008) - *The influence of specific mechanical energy on the ultrasonic characteristics of extruded dough*. Journal of Food Engineering, 86, 202–206;
- [26]. Soria A. C., Villamiel M. (2010) - *Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review*. Trends in Food Science & Technology 21, 323 - 331;
- [27]. Sujka M., Jamroz J. (2013) - *Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour*. Food Hydrocolloids, 31, 413-419;
- [28]. Vinatoru M., Toma M., Mason T. J. (1999) - *Ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from plants and the constituents*. Advances in Sonochemistry, 5, 216;
- [29]. Wójtowicz A., Mościcki L. (2008) - *Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, 2, 311-318;
- [30]. Zhu J., Li L., Chen L., Li X. (2012) - *Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules*. Food Hydrocolloids, 29, 116-122;
- [31]. Żelaziński T., Ekielski A. (2012) - *Sensory investigation covering maize-buckwheat extrudate*. Postępy techniki przetwórstwa spożywczego, 1, 50-54.
- [13]. Ekielski A., Osiak J. (2003) - *Wpływ stopnia zużycia elementów ekstrudera na wybrane parametry ekstruzji*. Inżynieria Rolnicza, 7(49), 39-46;
- [14]. Ekielski A., Żelaziński T. (2012) - *Wpływ porowatości na cechy teksturalne ekstrudatów zbożowych*. Inżynieria Rolnicza. Nr 3 (138). s. 35-42;
- [15]. Gosselin R., Rodrigue D. (2005) - *Analiza morfologiczna komórek zagęszczonych pianek polimerowych*. Polymer Testing, 24, 1027-1035;
- [16]. Hernoux A., Léveque J., Lassi U., Molina-Boisseaud S., Maraisd M. (2013) - *Przekształcanie odpadowej nierozpuszczalnej skrobi ziemniaczanej na cukry redukujące w ramach technologii niekonwencjonalnych*. Carbohydrate Polymers, 92, 2065–2074;
- [17]. Hromádková Z., Ebringerová A. (2003) - *Ultradźwiękowa ekstrakcja surowców roślinnych - badanie uwalniania hemicelulozy z łuski gryki*. Ultrasonics Sonochemistry, 10, 127–133;
- [18]. Jambrak A. R., Herceg Z., Šubarić D., Babić J., Brnčić M., Brnčić S. R., Bosiljkov T., Čvek D., Tripalo B., Gelo J. (2010) - *Wpływ ultradźwięków na fizyczne właściwości skrobi kukurydzianej*. Carbohydrate Polymers, 79, 91–100;
- [19]. Karkani O. A., Nenadis N., Nikiforidis C. V., Kiosseoglou V. (2013) - *Wpływ metod uzyskania oleju na właściwości utleniające i fizyczną stabilność olejowych emulsji do ciała*. Food Chemistry, 139, 640–648;
- [20]. Kobus Z. (2006) - *Zmiany temperatury miazgi marchwiowej podczas procesu sonifikacji*. Inżynieria Rolnicza, 7 (82), 255-261;
- [21]. Lanuay B., Lisch J. M. (1983) - *Dwuślakowa ekstruzja makaronów skrobiowych, ekspansja i mechaniczne właściwości ekstrudatów*. Journal of Food Engineering, 9 (2), 259–280;
- [22]. Lui W.-B., Peng J. (2005) - *Wpływ warunków procesu na właściwości amortyzujące struktury komórkowej i ciepło właściwe ekstrudatów*. Journal of Food Engineering, 70 (2), 171–182;
- [23]. Margulis M. A., Margulis I. M. (2003) - *Kalorymetryczna metoda pomiaru mocy akustycznej zaabsorbowanej w objętości cieczy*. Ultrasonic Sonochemistry, 10, 343–345.
- [24]. Mason T.J., Zhao Y. (1994) - *Ulepszona ekstrakcja ciał stałych z herbaty za pomocą ultradźwięków*. Ultrasonics, 32, 375-377;
- [25]. Owolabi G. M., Bassim M. N., Page J. H., Scanlon M. G. (2008) - *Wpływ właściwej energii mechanicznej na charakterystykę ultradźwiękową ekstrudowanego ciasta*. Journal of Food Engineering, 86, 202–206;
- [26]. Soria A. C., Villamiel M. (2010) - *Wpływ ultradźwięków na właściwości technologiczne i bioaktywność żywności: przegląd*. Trends in Food Science & Technology 21, 323 -331;
- [27]. Sujka M., Jamroz J. (2013) - *Skrobia traktowana ultradźwiękami: obrazowanie SEM i TEM oraz właściwości funkcjonalne*. Food Hydrocolloids, 31, 413-419;
- [28]. Vinatoru M., Toma M., Mason T. J. (1999) - *Wspomagana ultradźwiękami ekstrakcja cząstek bioaktywnych z roślin i ich części*. Advances in Sonochemistry, 5, 216;
- [29]. Wójtowicz A., Mościcki L. (2008) - *Energochłonność ekstruzji podgotowanego makaronu*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, 2, 311-318;
- [30]. Zhu J., Li L., Chen L., Li X. (2012) - *Badanie zmian supramolekularnych strukturalnych zmian cząstek skrobi poddanych obróbce ultradźwiękowej*. Food Hydrocolloids, 29, 116-122;
- [31]. Żelaziński T., Ekielski A. (2012) - *Badania sensoryczne ekstrudatów kukurydzian-gryczanych*. Postępy techniki przetwórstwa spożywczego, 1, 50-54.