

The subject of the doctoral dissertation: **Production of instant noodles from gluten-free flours by extrusion**

MSc. Dorota Monika Sokołowska

SUMMARY

Today, the most common diet-related disease of the 21st century worldwide is celiac disease. The only method used in its treatment is strict and regular adherence to a gluten-free diet throughout one's life. The diet of sick people should be based on their consumption of alternatives to grain products, including gluten-free bread, pasta, and various snacks. Over the past few years, the consumption of gluten-free products has been steadily increasing. The reason for this is not only the celiac disease, but also the need for a healthy lifestyle and increasing consumer awareness. Manufactured gluten-free food has to be constantly checked by manufacturers for gluten-free content. Changing consumer preferences and fast pace of life force manufacturers to expand their offer of convenient and functional products. Currently, modern methods are used to produce gluten-free products based on plants, which include extrusion. It is a highly efficient and versatile process that depends on the granulation of the plant material, temperature, moisture content of the raw material, screw speed of the extruder, time, pressure, torque and specific mechanical energy requirements. This method is used in the manufacturing of gluten-free products such as crackers, pellets, ice cream, meat analogs, snacks, confectionery, cookies, breakfast items, animal feeds and feeds, and pastas. The development of the market for extruded gluten-free food and the growing needs of consumers, contribute to the constant search for new raw materials by manufacturers and scientists around the world. Recently, flours from legumes, alternative cereals and pseudo-cereals have gained importance. Among this group of flours, buckwheat flour is worth mentioning, underestimated in European countries. On the basis of this raw material in Asian countries, gluten-free products are manufactured, such as instant noodles, bread, pizzoccheri, vermicelli, pancakes, crackers, naengmyeon, cookies and muffins. Moreover, the interest in this raw material is also due to the fact that it is rich in starches, fiber, protein, bioactive compounds lipids, minerals and vitamins. However, the selection of raw material alone is insufficient to produce gluten-free food of adequate consumer quality. The desired quality of extrudates can also be achieved by proper selection of extrusion parameters for a given type of raw material. Only the use of optimization procedures allows to identify the optimal extrusion parameters for raw materials and products that guarantee the production of a product of adequate quality.

A few studies, presented in domestic and foreign publications, concern the production of instant noodles with buckwheat flour. During my own research for my PhD thesis I decided to analyse more closely the potential of using this raw material for the production of instant noodles.

The analysis of the current state of knowledge in the area of the dissertation topic allowed me to formulate the main hypotheses of the dissertation: The first included the type and quality of gluten-free raw materials used in the production of extruded pasta, which were the factors determining the course of the extrusion process and the physicochemical characteristics of the obtained extruded instant noodles. The second referred to the screw speed of the extruder and the level of moistening of the raw materials, significantly differentiating the quality of the instant noodles produced.

The aim of the dissertation was to determine the influence of the gluten-free flours used, as well as the variable parameters of the extrusion process on the course of the extrusion process and on the sensory and physicochemical quality of the instant noodles obtained.

First, the scope of the dissertation concerned the development of suitable raw material recipes for the production of instant noodles from gluten-free flours, The second stage was to investigate the physicochemical characteristics of the raw materials used. This scope also included the application of variable parameters of the extrusion process for the TS-45 extruder equipped with a plasticizing system $L/D = 18:1$ in order to produce instant noodles, Performance tests of the extrusion process depending on the raw materials and parameters used were also carried out. Then the physicochemical and sensory characteristics of gluten-free pasta were investigated taking into account the variable parameters of the extrusion process. A statistical analysis of the obtained results was also developed. At the very end, the selection of optimal parameters was made in order to obtain products with the desired characteristics.

The materials used for gluten-free instant noodles were buckwheat flours (from unroasted and roasted buckwheat). At the very beginning, the granulation of the flours was measured. The production of instant noodles was analyzed by measuring the efficiency and energy consumption of the extrusion process and the radial expansion rate. Both in the raw materials and in the dry pasta, the content of moisture and dry matter, ash, protein, starch, fiber and its fractions, and color were determined on the CIE - Lab scale. In addition, the dry pasta was sensory evaluated on a 9-point hedonic scale and the cutting force required for destruction was measured. Hydrated pasta, on the other hand, was subjected to sensory evaluation on a 9-point hedonic scale and color measurement on the CIE - Lab scale. Minimum hydration time, losses of their components after hydration, WAI, WSI and WHC indexes and textural indices

(hardness, cohesive force, adhesion, elasticity, gumminess and chewiness) were also determined for them. After all research analyses were performed, the normality of the distribution was verified using the Shapiro-Wilk test. To verify the significance of differences for the mean, analysis of variance with repeated parameters and multiple comparisons test (Tukey's post - hoc test) at the significance level of $\alpha = 0.05$ were used. Statistica v. 13.1 package was used to develop all tests. Multivariate regression models were used to perform optimization of extruded instant noodles. They were created on the basis of experimental data, quality characteristics of instant noodles from unroasted and roasted buckwheat flour after hydration in hot water. In a further step, variables (d_1 - degree of wetting of flour [%] and d_2 - extruder screw speed [rpm^{-1}]) and decision criteria (K_1 - overall sensory evaluation after hydration [points], K_2 - minimum hydration time [min] and K_3 - loss of ingredients after hydration [%]) were determined and defined for each pasta. Mean Squared Prediction Error (mse) and Coefficient of determination R^2 (R-square Statistic or otherwise Coefficient of determination) were used to evaluate the quality of the model to the experimental data. The objective of the optimization was to identify the pasta characterized by the maximum value of criterion K_1 and the minimum values of criteria K_2 and K_3 with the set of decision variables d_1 and d_2 . The quality index defined was used to indicate the best solutions in the decision criteria space. The minimum value of the quality index K was 0 (utopian solution) and the maximum value was $\sqrt{3}$ (worst solution of the set). Based on this, the range of decision variables d_1 and d_2 for which the macarons had the highest quality index was determined. This range was presented as a percentage. Thus, the explicit form of the set of unacceptable (dominated) and acceptable (non-dominated Pareto-optimal) solutions for instant noodles made of unroasted and roasted buckwheat flour in the space of decision criteria (K_1 , K_2 and K_3) was determined. In this way, a set of Pareto-optimal and dominated solutions were presented in the three-dimensional decision criteria space using interpolation. Matlab program R2021a was used to generate the multivariate regression models.

Prior to the extrusion process of instant noodles, buckwheat flours were evaluated for their physicochemical characteristics. First, their granulation was evaluated, showing that the buckwheat flour was characterized by the lowest ridge weight (0.22%) and the highest sieving weight (99.78%). Relatively higher moisture content was recorded in unroasted buckwheat flour (14.60%). On the other hand, roasted buckwheat flour was characterized by a higher content of dry matter (88.11%). Higher concentration of ash (2.52 g/100g d.w.), protein (12.53% d.w.), starch (74.42% d.w.), fibre (5.21% d.w.), its fraction ADL (0.40% d.w.) and color markers a^* (5.32) and b^* (12.59) was characteristic for roasted buckwheat flour. On the

other hand, non-roasted buckwheat flour was characterized by increased content of fibre fraction (NDF 9.67% dry matter, ADF 1.72% dry matter, CEL 3.60% dry matter and HCEL 7.97% dry matter) and color indicator L^* (84.69).

The evaluated flours were moistened to moisture content of 31, 33 and 35% using water at 20°C. They were then mixed using a Nauta PEERYmix HV 50 conical mixer for 20 minutes to produce a dough. The resulting dough was subjected to aging for 30 minutes. Subsequently, the dough was transferred to a TS-45 single-screw extruder with an L/D = 18:1 plastification system connected to a glycol-fed cooling jacket (PPH Cool, Chotomow). The extrusion process was carried out at a temperature from 60 to 104°C and a pressure of 20 MPa. During this process, the introduced dough inside the extruder was mixed, boiled, and plasticized by varying the speed of the extruder screw (at 60, 80, or 100 rpm). The plasticized dough due to rapid expansion was pushed outside the extruder die through 12 holes of 0.80 mm diameter. The resulting spaghetti pasta strands were transferred to drying screens, where they were cooled to 20°C for 30 min. The sieves with the cooled pasta were placed in a drying oven, where the drying process was carried out at 40°C for 4 hours.

Based on the extrusion process, the highest average yield was achieved for roasted buckwheat flour pasta, which was 14.61 kg/h. Reduced energy intensity of the extrusion process occurred during extrusion of pasta from unroasted buckwheat flour (average 0.26 kWh kg⁻¹). On average, pasta from unroasted buckwheat flour showed an increased expansion ratio, for which it was equal to 1.54.

The obtained dry instant noodles from unroasted buckwheat flour were characterized by higher overall sensory evaluation (7.45 points), dry matter content (93.34%), protein content (11.03% d.m.), starch content (69.81% d.m.), fiber fractions ADF (0.95% d.m.) and CEL (0.87% d.m.), color distinction L^* (71.05) and cutting force (4.96 N). In contrast, dry noodles made from roasted buckwheat flour were characterized by increased moisture content (6.73%), fiber content (5.43% s.s.), fiber fractions NDF (1.75% s.s.), ADL (0.24% s.s.) and CEL (0.53% s.s.), and color discriminants a^* (8.17) and b^* (17.23).

In terms of overall sensory evaluation after hydration, pasta made of unroasted buckwheat flour received the highest score (7.53 points). This type of pasta was also characterized by increased color distinction L^* (58.40), higher WAI (6.80 g/g), WSI (5.04%) and WHC (356.44%) and increased textural indices (elasticity 0.63, gumminess 64.47 N and chewiness 40.67 N-mm) after hydration. Hydrated unroasted buckwheat flour pasta also exhibited lower hardness (147.24 N). On the other hand, pasta from roasted buckwheat flour was characterized by increased a^* (7.07) and b^* (11.14) color distinctions. Also, cohesive force (3.89 N) and

adhesion (5.85 mJ) were at increased levels. Moreover, the shortest minimum hydration time was recorded for roasted buckwheat flour pasta (3.93 minutes).

The applied optimization procedure allowed to identify solutions for pasta with the highest quality index obtained using a TS-45 single screw extruder with plasticizing system. The best index was obtained for pasta made of unroasted buckwheat flour at the degree of humidification in the range from 32 to 35% and extruder screw speed in the range from 60 to 80rpm. The apparent form of the first subset for pasta from roasted buckwheat flour showed that the highest quality index was achieved for the degree of wetting from 33.6 to 35% and the screw speed from 60 to 68 rpm. On the other hand, in the second subset, the quality index for roasted buckwheat flour pasta took the range of wetting level from 31 to 33%, and the extruder screw speed ranged from 68 to 82 rpm.

On the basis of the conducted research, conclusions were formulated, referring to the hypotheses and research problems of the paper. It was found that:

1. Type of gluten-free flours was a factor determining the course of the extrusion process and physicochemical characteristics of extruded gluten-free instant noodles.
2. Buckwheat flours, used to produce extruded pasta, were significantly different in terms of water content, dry matter, ash, starch, protein, fiber and its fractions, and color characteristics. On average, roasted buckwheat flour was more abundant in the analyzed physicochemical characteristics.
3. The type of raw materials used and process variables, such as the degree of moistening of the flours and extruder screw speed, significantly affected the physicochemical characteristics of the instant noodles produced in the dry state and after hydration.
4. Significantly higher efficiency of the extrusion process was observed when roasted buckwheat flour was used, at the highest extruder screw speed (100 rpm) and at low moisture content of the raw materials (31-33%). For the same type of buckwheat flour, lower energy consumption of the pasta extrusion process was demonstrated at 60 rpm of the extruder screw and at a lower level of wetting. On the other hand, the lowest value of expansion rate was the result of the production of instant noodles from roasted buckwheat flour, with extrusion parameters of: 35% wetting and screw speed in the range of 60-80 rpm.
5. Gluten-free pasta made from buckwheat flour was characterized by the highest overall sensory quality, both in the dry state and after hydration, when the lowest analyzed screw speed of the extruder and degree of wetting of the flour at the level of 31-33% were used. On the other hand, the evaluation of the color indices of extruded pasta, in the dry and

- hydrated state, showed that the products made from buckwheat flour, not roasted, moistened to the level of 35% and with the use of extruder screw speed at the level of 100 rpm, were characterized by higher values of color indices.
6. Analysis of the composition of extruded gluten-free instant noodles proved that it significantly depended on the type of raw material and process variables. The highest content of ash, protein, starch, and fiber fraction ADF and CEL was characterized by the product, made of unroasted buckwheat flour. On the other hand, pasta extruded from roasted buckwheat flour was richer in fiber and its three fractions (NDF, ADL and HCEL).
 7. The evaluation of instant noodles after the hydration process showed that individual parameters significantly depended on raw material and process variables. It was shown that higher values of indices after cooking of the products resulted from the use of unroasted buckwheat flour. The lowest minimum hydration time and the smallest loss of components after cooking, as well as the highest water adsorption, solubility, absorption and retention rates were recorded for this type of raw material. On average, better results were observed with lower raw material wetting and higher extruder screw speeds.
 8. evaluation of textural indices of gluten-free instant noodles proved that they were significantly influenced by both raw material and process variables. Pasta produced from roasted buckwheat flour at lower extruder screw speed was characterized by the highest hardness, cohesive force and adhesion. On the other hand, the highest elasticity, gumminess and chewability were characteristic for pasta produced from buckwheat flour, using raw material with the lowest moisture content (31%) and at an average speed of 80 rpm.
 9. On the basis of the proposed optimization procedure, it was found that solutions corresponding to pasta with the highest value of the quality index were obtained using a TS-45 single-screw extruder with plasticizing system, from unroasted buckwheat flour for the range of wetting degree from 32 to 35% and extruder screw speed from 60 to 80rpm. The analysis of open harvest form for roasted buckwheat flour showed that, in case of the first subset, the range of degree of wetting belonged to the interval from 33,6 to 35%, and the rotational speed belonged to the range from 60 to 68 rpm. In the case of the second subset for pasta from roasted buckwheat flour, the range of the degree of wetting belonged to the interval from 31 to 33%, and the rotation speed of the extruder screw belonged to the range from 68 to 82 rpm.

Temat rozprawy doktorskiej: **Wytwarzanie makaronów błyskawicznych z mąk bezglutenowych metodą ekstruzji**

mgr inż. Dorota Monika Sokółowska

STRESZCZENIE

Obecnie najczęściej występującą chorobą dietozależną XXI wieku na świecie jest celiakia. Jediną metodą stosowaną w jej leczeniu jest ścisłe i regularne przestrzeganie diety bezglutenowej w ciągu całego swojego życia. Dieta osób chorych powinna opierać się na spożywaniu przez nie alternatyw dla produktów zbożowych m.in. bezglutenowego chleba, makaronów oraz różnego rodzaju przekąsek. W ciągu ostatnich kilku lat spożycie produktów bezglutenowych stale wzrasta. Przyczyną tego jest nie tylko przypadłość celiakii, ale również potrzeba zdrowego stylu życia i wzrastająca świadomość konsumentka. Wytwarzana żywność bezglutenowa musi być stale kontrolowana przez producentów pod kątem braku zawartości glutenu. Zmieniające się preferencje konsumentckie i szybkie tempo życia wymuszają na producentach poszerzenie swojej oferty produktów wygodnych i funkcjonalnych. Aktualnie do wytwarzania produktów bezglutenowych na bazie roślin są wykorzystywane nowoczesne metody, do których można zaliczyć m.in. ekstruzję. Jest ona wysokowydajnym i uniwersalnym procesem, zależnym od granulacji materiału roślinnego, temperatury, dowilżenia surowca, prędkości obrotowej ślimaka wylączarki, czasu, ciśnienia, momentu obrotowego i specyficznego zapotrzebowania na energię mechaniczną. Metoda ta znajduje zastosowanie podczas wytwarzania produktów bezglutenowych, takich jak krakersy, pellety, lody, analogi mięsa, przekąski, wyroby cukiernicze, herbatniki, galanteria śniadaniowa, karmy i pasze dla zwierząt oraz makarony. Rozwój rynku ekstrudowanej żywności bezglutenowej i rosnące potrzeby konsumentów, przyczyniają się do ciągłego poszukiwania nowych surowców przez producentów i naukowców na całym świecie. W ostatnim czasie na znaczeniu zyskały mąki z roślin bobowatych, zbóż alternatywnych oraz pseudozbóż. Spośród tej grupy mąk na uwagę zasługuje niedoceniona w krajach europejskich mąka gryczana. Na bazie tego surowca w krajach azjatyckich, wytwarzane są bezglutenowe produkty m.in. makarony błyskawiczne, pieczywo, pizzoccheri, wermi-celle, naleśniki, krakersy, naengmyeon, ciastka oraz babeczki. Ponadto zainteresowanie tym surowcem wynika także z faktu jego bogatej zawartości w skrobie, błonnik, białko, związki bioaktywne lipidy, minerały i witaminy. Jednak sam dobór surowca jest niewystarczający do produkcji bezglutenowej żywności o odpowiedniej jakości konsumentckiej. Pożądaną jakość ekstrudatów można osiągnąć także przez właściwy dobór

parametrów ekstruzji dla danego rodzaju surowca. Tylko zastosowanie procedur optymalizacyjnych pozwala na wskazanie optymalnych parametrów ekstruzji dla surowców i produktów gwarantujących produkcję wyrobu o odpowiedniej jakości.

Nieliczne badania, prezentowane w publikacjach krajowych i zagranicznych, dotyczą wytwarzania makaronów błyskawicznych z udziałem mąki gryczanej. Podczas własnych badań nad pracą doktorską postanowiono dokonać bliższej analizy potencjału wykorzystania tego surowca do produkcji makaronów błyskawicznych.

Przeprowadzona analiza aktualnego stanu wiedzy z obszaru tematyki pracy, pozwoliła na sformułowanie głównych hipotezy pracy doktorskiej: Pierwsza z nich obejmowała rodzaj i jakość surowców bezglutenowych użytych do produkcji ekstrudowanych makaronów które były czynnikami determinującymi przebieg procesu ekstruzji oraz wyróżniki fizykochemiczne otrzymanych ekstrudowanych makaronów błyskawicznych. Natomiast druga odnosiła się do prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera i poziomu dowilżenia surowców istotnie różnicujących jakość wytwarzanych makaronów błyskawicznych.

Celem rozprawy doktorskiej było określenie wpływu użytych mąk bezglutenowych, a także zmiennych parametrów procesów ekstruzji na przebieg procesu ekstruzji oraz na jakość sensoryczną i fizykochemiczną otrzymanych makaronów błyskawicznych.

W pierwszej kolejności zakres rozprawy doktorskiej dotyczył opracowania odpowiednich receptur surowcowych do wytworzenia makaronów błyskawicznych z mąk bezglutenowych. Drugim etapem było zbadanie wyróżników fizykochemicznych zastosowanych surowców. Zakres ten obejmował także zastosowanie zmiennych parametrów procesu ekstruzji dla ekstrudera TS-45 wyposażonego w układ plastyfikujący $L/D = 18:1$ w celu wytworzenia makaronów błyskawicznych. Przeprowadzono również badania eksploatacyjne procesu ekstruzji w zależności od zastosowanych surowców oraz parametrów. Następnie zbadano wyróżniki fizykochemiczne i sensoryczne makaronów bezglutenowych przy uwzględnieniu zmiennych parametrów procesu ekstruzji. Opracowano również analizę statystyczną otrzymanych wyników badań. Na sam koniec dokonano wyboru optymalnych parametrów w celu uzyskania produktów o pożądanym cechach.

Materiałem użytym do produkcji bezglutenowych makaronów błyskawicznych były mąki gryczane (z gryki nieprażonej i prażonej). Na samym wstępie dokonano pomiaru granulacji mąk. Wytwarzając makarony błyskawiczne analizie poddano pomiar wydajności i energochłonności procesu ekstruzji oraz wskaźnika ekspandowania promieniowego. Zarówno w surowcach, jak i w makaronach suchych, oznaczono zawartość wilgotności i suchej substancji, popiołu, białka, skrobi, błonnika i jego frakcji oraz barwę w skali CIE – Lab.

Dodatkowo w makarony suche oceniono sensorycznie w 9 – stopniowej skali hedonicznej i zmierzono ich siłę cięcia, która była niezbędna do ich zniszczenia. Natomiast makarony hydratowane poddano ocenie sensorycznej w 9 – stopniowej skali hedonicznej i pomiarowi barwy w skali CIE – Lab. Określono także dla nich minimalny czas hydratacji, straty ich składników po hydratacji, wskaźnik WAI, WSI i WHC oraz wskaźniki teksturalne (twardość, siła kohezji, adhezja, sprężystość, gumowatość i żuwalność). Po wykonaniu wszystkich analiz badawczych przeprowadzono weryfikację normalności rozkładu za pomocą testu Shapiro – Wilka. Do weryfikacji istotności różnic dla średniej posłużono się analizą wariancji z powtarzającymi parametrami oraz testem wielokrotnych porównań (test post – hoc Tukeya) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Do opracowania wszystkich testów użyto pakietu *Statistica v. 13.1*. Do przeprowadzenia optymalizacji ekstrudowanych makaronów błyskawicznych użyto modeli regresji wielowymiarowej. Stworzono je na podstawie danych eksperymentalnych, cech jakościowych makronów błyskawicznych z mąki gryczanej nieprażonej i prażonej po hydratacji w gorącej wodzie. W dalszym etapie dla poszczególnych makaronów wyznaczono i zdefiniowano zmienne (d_1 – stopień dowilżenia mąki [%] i d_2 – obroty ślimaka ekstrudera [$\text{obr}/\text{min}^{-1}$]) i kryteria decyzyjne (K_1 – ogólna ocena sensoryczna po hydratacji [pkt], K_2 – minimalny czas hydratacji [min] i K_3 – straty składników po hydratacji [%]). Do oceny jakości modelu do danych eksperymentalnych wykorzystano wskaźnik średniokwadratowego błędu predykcji *mse* (z ang. *Mean Squared Prediction Error*) i współczynnik determinacji R^2 (z ang. *R-square Statistic* lub inaczej z ang. *Coefficient of determination*). Celem optymalizacji było wskazanie makaronu, cechującego się maksymalną wartością kryterium K_1 oraz minimalnymi wartościami kryteriów K_2 i K_3 przy zestawie zmiennych decyzyjnych d_1 i d_2 . Zdefiniowany wskaźnik jakości służył wskazaniu najlepszych rozwiązań w przestrzeni kryteriów decyzyjnych. Minimalna wartość wskaźnika jakości K wynosiła 0 (rozwiązanie utopijne), a maksymalna $\sqrt{3}$ (rozwiązanie najgorsze ze zbioru). Na tej podstawie określono zakres zmiennych decyzyjnych d_1 oraz d_2 , dla których makarony posiadały najwyższy wskaźnik jakości. Zakres ten przedstawiono w postaci procentowej. Wyznaczono w ten sposób jawną postać zbioru rozwiązań niedopuszczalnych (zdominowanych) i dopuszczalnych (niezdominowanych Pareto – optymalnych) dla makaronów błyskawicznych z mąki gryczanej nieprażonej i prażonej w przestrzeni kryteriów decyzyjnych (K_1 , K_2 i K_3). W ten sposób za pomocą interpolacji przedstawiono w trójwymiarowej przestrzeni kryteriów decyzyjnych zbiór rozwiązań Pareto optymalnych i zdominowanych. Do wygenerowania modeli regresji wielowymiarowej wykorzystano program *Matlab R2021a*.

Przed przystąpieniem do procesu ekstruzji makaronów błyskawicznych mąki gryczane poddano ocenie ich wyróżników fizykochemicznych. W pierwszej kolejności oceniono ich granulację, wykazując, iż mąka gryczana cechowała się najniższą masą zlotu (0,22%) i najwyższą masą przesiewu (99,78%). Stosunkowo większą wilgotność odnotowano w mące gryczanej nieprażonej (14,60%). Natomiast wyższą zawartością suchej substancji charakteryzowała się mąka gryczana prażona (88,11%). Większą koncentrację popiołu (2,52 g/100g s.s.), białka (12,53% s.s.), skrobi (74,42% s.s.), błonnika (5,21% s.s.), jego frakcji ADL (0,40% s.s.) i wyróżników barwy a^* (5,32) i b^* (12,59) posiadała mąka gryczana prażona. Z kolei mąka gryczana nieprażona odznaczała się zwiększoną zawartością frakcji błonnika (NDF 9,67% s.s., ADF 1,72% s.s., CEL 3,60% s.s. i HCEL 7,97% s.s.) oraz wyróżnikiem barwy L^* (84,69).

Oceniłone mąki zostały dowilżone do stopnia wilgotności 31, 33 i 35% za pomocą wody o temperaturze 20°C. Następnie w celu wytworzenia ciasta wymieszano je za pomocą mieszalnika stożkowego Nauta PEERYmix HV 50 przez 20 minut. Otrzymane ciasto poddano leżakowaniu przez 30 minut. W dalszej kolejności ciasto przeniesiono do ekstrudera jednoślیمakowego TS-45 z układem plastyfikującym L/D = 18:1, połączonym z płaszczem chłodzącym zasilanym glikolem (PPH Cool, Chotomów). Proces ekstruzji prowadzono w temperaturze od 60 do 104°C i ciśnieniu 20 MPa. Podczas tego procesu wprowadzone ciasto do wewnątrz ekstrudera zostało wymieszane, zagotowane i uplastycznione za pomocą zmiennych obrotów ślimaka ekstrudera (na poziomie 60, 80 lub 100 obr/min). Uplastycznione ciasto w wyniku gwałtownego ekspandowania zostało wypchnięte na zewnątrz matrycy ekstrudera przez 12 otworów o średnicy 0,80 mm. Otrzymane nitki makaronów *spaghetti* przeniesiono na sita suszarnicze, gdzie schłodzono je do temperatury 20°C przez 30 minut. Sita ze schłodzonymi makaronami umieszczono w suszarce, gdzie prowadzono proces suszenia w temperaturze 40°C przez 4 godziny.

Na podstawie badań, dotyczących procesu ekstruzji, największą średnią wydajność osiągnięto dla makaronów z mąki gryczanej prażonej, która kształtowała się na poziomie 14,61 kg/h. Zmniejszona energochłonność procesu ekstruzji wystąpiła podczas wytłaczania makaronów z mąki gryczanej nieprażonej (średnio 0,26 kWh·kg). Średnio zwiększonym wskaźnikiem ekspandowania odznaczały się makarony z mąki gryczanej nieprażonej, dla których był równy 1,54.

Otrzymane suche makarony błyskawiczne z mąki gryczanej nieprażonej, charakteryzowały się wyższą ogólną oceną sensoryczną (7,45 pkt), zawartością suchej substancji (93,34%), białka (11,03% s.s.), skrobi (69,81% s.s.), frakcji błonnika ADF (0,95%

s.s.) i CEL (0,87% s.s.), wyróżnikiem barwy L* (71,05) oraz siłą cięcia (4,96 N). Natomiast suche makarony z mąki gryczanej prażonej odznaczały się podwyższoną zawartością wilgotności (6,73%), błonnika (5,43% s.s.), frakcji błonnika NDF (1,75% s.s.), ADL (0,24% s.s.) i CEL (0,53% s.s.) oraz wyróżników barwy a* (8,17) oraz b* (17,23).

Pod względem ogólnej oceny sensorycznej po hydratacji, najwyższą notę otrzymały makarony z mąki gryczanej nieprażonej (7,53 pkt). Ten rodzaj makaronów odznaczał się również podwyższonym wyróżnikiem barwy L* (58,40), wyższymi wskaźnikami WAI (6,80 g/g), WSI (5,04%) i WHC (356,44%) oraz zwiększonymi wskaźnikami teksturalnymi (sprężystość 0,63, gumowatość 64,47 N i zuwalność 40,67 N·mm) po hydratacji. Hydratowane makarony z mąki gryczanej nieprażonej odznaczały się także niższą twardością (147,24 N). Z kolei makarony z mąki gryczanej prażonej charakteryzowały się zwiększonymi wyróżnikami barwy a* (7,07) i b* (11,14). Również siła kohezji (3,89 N) i adhezja (5,85 mJ) były na podwyższonym poziomie. Ponadto najkrótszy minimalny czas hydratacji odnotowano dla makaronu z mąki gryczanej prażonej (3,93 minuty).

Zastosowana procedura optymalizacyjna pozwoliła na wskazanie rozwiązań dla makaronów o najwyższym wskaźniku jakości otrzymanych za pomocą ekstrudera jednoślimakowego TS-45 z układem plastyfikującym. Najlepszy wskaźnik otrzymano dla makaronów z mąki gryczanej nieprażonej przy stopniu dowilżenia z przedziału od 32 do 35% i obrotach ślimaka ekstrudera z zakresu od 60 do 80 obr/min. Jawna postać pierwszego podzbioru dla makaronów z mąki gryczanej prażonej wykazała, że najwyższy wskaźnik jakości osiągnięto dla stopnia dowilżenia od 33,6 do 35% i prędkość obrotowej od 60 do 68 obr/min. Natomiast w drugim podzbiornie wskaźnik jakości dla makaronów z mąki gryczanej prażonej przyjął zakres poziomu dowilżenia od 31 do 33%, a obroty ślimaka ekstrudera mieściły się w przedziale od 68 do 82 obr/min.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski, odnoszące się do hipotez i problemów badawczych pracy. Stwierdzono, że:

1. Rodzaj mąk bezglutenowych był czynnikiem determinującym przebieg procesu ekstruzji oraz wyróżniki fizykochemiczne ekstrudowanych bezglutenowych makaronów błyskawicznych.
2. Mąki gryczane, wykorzystane do wytworzenia ekstrudowanych makaronów, były istotnie zróżnicowane pod kątem zawartości wody, suchej substancji, popiołu, skrobi, białka, błonnika i jego frakcji, a także wyróżników barwy. Mąka gryczana prażona była przeciętnie bardziej zasobna w analizowane wyróżniki fizykochemiczne.

3. Rodzaj wykorzystanych surowców oraz zmienne procesowe, jak stopień dowilżenia mąk oraz prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera, istotnie wpłynęły na cechy fizykochemiczne wytworzonych makaronów błyskawicznych w stanie suchym oraz po procesie hydratacji.
4. Istotnie wyższą wydajność procesu ekstruzji odnotowano w przypadku wykorzystania mąki gryczanej prażonej, przy zastosowaniu najwyższej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera (100 obr/min) oraz przy niskim stopniu dowilżenia surowców (31-33%). Dla tego samego rodzaju mąki gryczanej wykazano niższą energochłonność procesu ekstruzji makaronów, przy 60 obr/min ślimaka ekstrudera i przy obniżonym poziomie dowilżenia. Natomiast najniższa wartość wskaźnika ekspandowania była efektem wytwarzania makaronów błyskawicznych z mąki gryczanej prażonej, przy parametrach ekstruzji wynoszących: 35% dowilżenia oraz prędkość ślimaka w zakresie 60-80 obr/min.
5. Istotnie najwyższą ogólną jakością sensoryczną, zarówno w stanie suchym, jak i po hydratacji, cechowały się makarony bezglutenowe, wyprodukowane z mąki gryczanej nieprażonej, przy zastosowaniu najniższej analizowanej prędkości ślimaka ekstrudera oraz stopnia dowilżenia mąk na poziomie 31-33%. Natomiast ocena wskaźników barwy makaronów ekstrudowanych, w stanie suchym i hydratowanym, wykazała, że wyższymi wartościami wskaźników barwy odznaczały się produkty, wytworzone z mąki gryczanej nieprażonej, dowilżonej do poziomu 35% i przy wykorzystaniu obrotów ślimaka ekstrudera na poziomie 100 obr/min.
6. Analiza składu ekstrudowanych bezglutenowych makaronów błyskawicznych dowiodła, że istotnie zależał on rodzaju surowca oraz zmiennych procesowych. Najwyższą zawartością popiołu, białka, skrobi oraz frakcji błonnika ADF i CEL odznaczał się produkt, wytworzony z mąki gryczanej nieprażonej, przy czym przeciętnie lepsze efekty obserwowano, gdy ekstruzja prowadzona była przy niższych obrotach śruby ekstrudera i mniejszym poziomie dowilżenia surowca. Natomiast makarony, ekstrudowane z mąki gryczanej prażonej, były bogatsze w błonnik oraz trzy jego frakcje (NDF, ADL i HCEL).
7. Ocena makaronów błyskawicznych po procesie hydratacji wykazała, że poszczególne wyróżniki istotnie zależały od zmiennych surowcowych oraz procesowych. Wykazano, że wyższe wartości wskaźników po ugotowaniu produktów wynikały z zastosowania mąki gryczanej nieprażonej. Dla tego rodzaju surowca odnotowano najniższy minimalny czas hydratacji i najmniejsze straty składników po ugotowaniu, oraz

- najwyższe wskaźniki adsorpcji wodnej, rozpuszczalności, pochłaniania i zatrzymywania wody. Przeciwnie lepsze efekty zaobserwowano w przypadku niższego stopnia dowilżenia surowców oraz wyższych prędkości obrotowych ślimaka ekstrudera.
8. Ocena wskaźników teksturalnych błyskawicznych makaronów bezglutenowych dowiodła, że istotnie wpływały na nie zarówno zmienne surowcowe, jak i procesowe. Najwyższą twardością, siłą kohezji oraz adhezją odznaczały się makarony wytworzone z mąki gryczanej prażonej, przy niższych obrotach ślimaka ekstrudera. Natomiast najwyższą sprężystością, gumowatością oraz żuwalnością charakteryzowały się makarony, wyprodukowane z mąki gryczanej nieprażonej, przy zastosowaniu surowca o najniższym stopniu dowilżenia (31%) oraz przy średniej prędkości obrotowej rzędu 80 obr/min.
 9. Na podstawie zaproponowanej procedury optymalizacyjnej stwierdzono, iż rozwiązania odpowiadające makaronom o najwyższej wartości wskaźnika jakości, otrzymano przy wykorzystaniu ekstrudera jednoślimakowego TS-45 z układem plastyfikującym, z mąki gryczanej nieprażonej dla zakresu stopnia dowilżenia z przedziału od 32 do 35% oraz wartości obrotów ślimaka ekstrudera z zakresu od 60 do 80 obr/min. Natomiast analiza jawnej postaci zbiorów dla mąki gryczanej prażonej wykazała, iż, w przypadku pierwszego podzbioru zakres stopnia dowilżenia należał do przedziału od 33,6 do 35%, a prędkość obrotowa należała do zakresu od 60 do 68 obr/min. W przypadku drugiego podzbioru dla makaronów z mąki gryczanej prażonej zakres poziomu dowilżenia zawierał się w przedziale od 31 do 33%, a obroty ślimaka ekstrudera należały do zakresu od 68 do 82 obr/min.