

ACTA AGROPHYSICA MONOGRAPHIAE



**ZASTOSOWANIE OBRÓBKİ CIŚNIENIOWO-TERMICZNEJ
W WYTWARZANIU ZBOŻOWO-TŁUSZCZOWYCH
KONCENTRATÓW PASZOWYCH**

Paweł Sobczak

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

2013 (1)

Redaktor Naczelny – Józef Horabik
Zastępca Redaktora Naczelnego – Grzegorz Józefaciuk
Sekretarz Redakcji – Wanda Woźniak
Redaktor Tematyczny – Jerzy Lipiec
Redaktor Statystyczny – Zofia Hanusz
Redaktor Języka Polskiego – Barbara Pietrasiewicz
Redaktor Języka Angielskiego – Tomasz Bylica

Rada Redakcyjna

Dorota Witrowa-Rajchert – Przewodnicząca

Andrey Alekseev, Rosja	Viliam Novák, Słowacja
Tadeusz Filipek, Polska	Josef Pecen, Czechy
Jarosław Frączek, Polska	Pedro Aguado Rodriguez, Hiszpania
Werner Herppich, Niemcy	István Seres, Węgry
Andrzej Lenart, Polska	Stanisław Skonecki, Polska
Janusz Olejnik, Polska	Jerzy Weres, Polska
Leonid Muravsky, Ukraina	Gerd Wessolek, Niemcy

Opiniowali do druku:

Barbara Kłoczek
Tadeusz Rawa

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (81) 744-50-61, www.ipan.lublin.pl

Streszczenia i pełne teksty prac dostępne są na stronie internetowej czasopisma
www.acta-agrophysica-monographiae.org

Czasopismo jest umieszczone w następujących bazach:

ICM, Polish Scientific Journals Contents – Life Sci., Agro,
Index Copernicus Journal Master List,
Naukowe i Fachowe Polskie Czasopisma Elektroniczne, Lonicera – serwis botaniczny
©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2013

ISSN 2084-3429, ISBN 978-83-89969-03-3

Acta Agrophysica są do nabycia w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie. Prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie oraz w oddziałach firmy Kolporter S.A. na terenie całego kraju. Informacje pod numerem infolinii 0801-205-555 lub na stronie internetowej <http://www.kolporter-spolka-akcyjna.com.pl/prenumerata.asp>

Wydanie I. Nakład 200 egz., ark. 6,8
Skład komputerowy: Wanda Woźniak
Druk: ALF-GRAF, ul. Abramowicka 6, 20-391 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY	8
2.1. Obróbka ciśnieniowo-termiczna surowców roślinnych	8
2.2. Charakterystyka surowców paszowych poddawanych procesowi ekstruzji	9
2.3. Rola tłuszczu i aminokwasów w żywieniu zwierząt	12
2.4. Metody natłuszczania pasz – różne koncepcje	15
2.5. Charakterystyka materiałów porowatych	20
2.6. Teoretyczna analiza wnikania tłuszczu w materiał porowaty	23
2.7. Podsumowanie przeglądu literatury	25
3. CEL I ZAKRES PRACY	26
4. METODYKA BADAŃ	27
4.1. Wybór materiału doświadczalnego	27
4.2. Badania wstępne	28
4.3. Ocena wybranych właściwości fizycznych	29
4.4. Pomiar zawartości tłuszczu	29
4.5. Badanie tekstury porowatej metodą porozymetrii rtęciowej	30
4.6. Badanie porowatości za pomocą niskotemperaturowej adsorpcji azotu	31
4.7. Pomiar średnicy porów metodą zdjęć mikroskopowych	32
4.8. Sposób natłuszczania surowca	32
4.9. Granulowanie z dodatkiem koncentratów tłuszczowych	33
4.10. Analiza statystyczna wyników badań	36
5. WYNIKI BADAŃ	36
5.1. Przygotowanie surowca do procesu natłuszczania	36
5.2. Porowatość i wymiary porów	41
5.2.1. Pomiar porowatości metodą porozymetrii rtęciowej	41
5.2.2. Pomiar porowatości za pomocą niskotemperaturowej adsorpcji azotu	47
5.2.3. Pomiar średnicy porów za pomocą mikroskopu optycznego	51

5.3.	Ocena procesu natłuszczania oraz charakterystyka koncentratu tłuszczowego	55
5.4.	Ocena procesu granulowania oraz charakterystyka granulatu z dodatkiem wytworzonego koncentratu tłuszczowego	63
6.	DYSKUSJA	69
7.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	74
8.	PIŚMIENNICTWO	76
9.	STRESZCZENIE	81
10	SUMMARY	83

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

PSZ – śruta pszena,

PSZ 0-1 – ekstrudat pszena o wymiarze cząsteczek do 1 mm,

PSZ 1-2,5 – ekstrudat pszena o wymiarze cząsteczek od 1 mm do 2,5 mm,

PSZ 2,5 – ekstrudat pszena o wymiarze cząsteczek powyżej 2,5 mm,

KUK – śruta kukurydziana,

KUK 0-1 – ekstrudat kukurydziany o wymiarze cząsteczek do 1 mm,

KUK 1-2,5 – ekstrudat kukurydziany o wymiarze cząsteczek od 1 mm do 2,5 mm,

KUK 2,5 – ekstrudat kukurydziany o wymiarze cząsteczek powyżej 2,5 mm,

BET – izoterma Brunauera, Emmetta i Tellera.

Porowatość (metoda rtęciowa)

r – promień porów, nm

γ – napięcie powierzchniowe rtęci, $\text{nN}\cdot\text{m}^{-1}$

θ_1 – graniczny kąt zwilżania,

Δp – różnica ciśnienia rtęci i ciśnienia gazu w porach, $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$,

p_2 – zastosowane ciśnienie bezwzględne, $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Porowatość (metoda gazowa)

V – objętość całkowita zaadsorbowanego adsorbatu pod ciśnieniem p , cm^3 ,

V_m – objętość adsorbatu przy całkowitym pokryciu adsorbentu warstwą monomolekularną, cm^3 ,

p – ciśnienie równowagowe odpowiadające objętości zaadsorbowanego adsorbatu V w warunkach pomiaru, Pa,

p_0 – ciśnienie pary nasyconej adsorbatu, Pa,

c – stała równowagi adsorpcji związana z różnicą pomiędzy ciepłem adsorpcji pierwszej warstwy i ciepłem kondensacji,

N_A – liczba Avogadra ($6,022\cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$),

a_m – powierzchnia siadania cząsteczki azotu, ($16,2\cdot 10^{-20} \text{ m}^2$),

M – masa cząsteczkowa adsorbatu, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$,

V_L – objętość molowa azotu (22414 cm^3),

p_0' – prężność pary nasyconej nad płaską powierzchnią cieczy, Pa,

p' – prężność pary nasyconej nad meniskiem o promieniu krzywizny r , Pa,

γ – napięcie powierzchniowe ciekłego adsorbatu, $\text{nN}\cdot\text{m}^{-1}$,

$R = 8,314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$, stała gazowa,

T – temperatura bezwzględna, K,

θ – kąt zwilżania ścianek porów ciekłym adsorbatem (dla azotu $\theta = 0$),

S_{BET} – powierzchnia właściwa, $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$.

Natluszczenie

S_y – odchylenie standardowe,

y – średnia,

CV – współczynnik zmienności %.

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych czynników warunkujących uzyskanie dobrych efektów produkcji zwierzęcej jest optymalne i racjonalne żywienie zwierząt. Intensyfikacja produkcji mleka i mięsa wiąże się głównie z produkcją pasz. Proces żywienia poszczególnych zwierząt warunkuje ich zdrowy rozwój i płodność. Kierując świadomie żywieniem, można osiągnąć określoną użytkowość zwierząt. Pokarm przez nie spożyty podlega przemianom, których wynikiem jest przekształcenie składników paszy na składniki ciała zwierzęcia lub na energię.

Zaletą stosowania procesu granulowania pasz jest to, że zwierzęta pobierają wszystkie surowce znajdujące się w mieszance bez możliwości wybierania poszczególnych składników. Poza tym proces granulowania redukuje poziom bakterii i grzybów w mieszance oraz znacznie ułatwia magazynowanie i transport paszy. Jakość i trwałość produkowanych peletów zależy od doboru urządzeń do procesu granulowania oraz składu surowcowego, a w szczególności dodatku tłuszczu. Przyjmuje się, że maksymalny dodatek tłuszczu do granulatu wynosi 6%, ponieważ większa jego ilość w paszy znacznie pogarsza trwałość produktu, ale jednocześnie jego udział znacznie poprawia wartość energetyczną paszy oraz jest nośnikiem witamin A, D, E i K, przez co producenci chętnie stosowali by większy jego dodatek.

Ciągły rozwój przemysłu paszowego związany z wykorzystywaniem nowych technologii powoduje konieczność prowadzenia dalszych badań towarzyszących przetwarzaniu surowców.

Jedną ze stosunkowo nowych dziedzin produkcji wprowadzanych do wytwarzania pasz jest proces ekstruzji. W latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia zaczęto wprowadzać w produkcji pasz ekspandery, które służyły głównie jako wysokotemperaturowe kondycjonery przed granulowaniem. Następnie proces ekspandowania na trwałe wszedł do termicznego przetwórstwa surowców paszowych, głównie do produkcji karm specjalistycznych tj.: dla zwierząt domowych, ryb i drobiu lub komponentów paszowych. Obróbka ciśnieniowo-termiczna w produkcji pasz przemysłowych jest stosowana głównie tam gdzie wymagana jest termiczna obróbka surowców oraz aglomeracja pasz o podwyższonej wilgotności. Proces ekstruzji powoduje całkowite lub częściowe unieczynnienie składników antyżywniowych w obrabianych surowcach paszowych, podwyższa ich strawność i sprawia, że pasze mogą być podawane młodym zwierzętom, co stanowi jego dużą zaletę. Natomiast jego wadą jest wysoka energochłonność. Jednak coroczny wzrost popytu na specjalistyczne karmy dla psów i kotów powoduje dynamiczny rozwój aplikacji techniki ekstruzji, na stale umacniając ją na rynku.

Wzrastające wymagania farmerów oraz poszukiwanie nowych, ekonomicznych metod produkcji pasz a jednocześnie zachowanie wysokiej jakości produktu wymagają dalszych badań naukowych. Takim rozwiązaniem w produkcji pasz może być połączenie obróbki ciśnieniowo-termicznej z tradycyjną technologią wytwarzania mieszanek lub granulatów paszowych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Obróbka ciśnieniowo-termiczna surowców roślinnych

Obróbka ciśnieniowo-termiczna, popularnie zwana ekstruzją, znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle rolno-spożywczym oraz w produkcji pasz specjalistycznych. Do przemysłu paszowego weszła w latach sześćdziesiątych, kiedy rozpoczęto obróbkę pełnotłustych nasion soi. Z biegiem czasu techniki stosowane i sprawdzone w przetwórstwie nasion i różnych mieszanek na cele spożywcze przeniesione zostały na cele przetwórstwa paszowego. Znane jest powszechnie wykorzystanie ekstruzji do otrzymywania różnego rodzaju galanterii spożywczej tj.: chrupiek, przekąsek, analogów mięsa, czy też karmy dla zwierząt domowych i ryb. Szerokie zastosowanie ekstruzji wynika z możliwości modyfikacji procesu poprzez zastosowanie np. ogrzewania lub chłodzenia segmentów ekstrudera, zastosowanie matryc formujących o zróżnicowanych kształtach, czy też zmianę konfiguracji ślimaków tłoczących (Abecassis i in. 1994, Andersson i Hedlung 1990, Barres i in. 1990, Mościcki 1999a).

Charakterystycznym efektem w obróbce ciśnieniowo-termicznej jest ekspandowanie otrzymanego produktu, w wyniku którego otrzymujemy produkt budową zbliżony do plastra miodu. Powstająca struktura jest następstwem gwałtownej przemiany wody zawartej w produkcie w parę wodną. W ekstrudowanej masie następuje zamykanie błon białkowych, które tworzą komórki, a skrobia w wyniku odwodnienia traci swą plastyczność i utrwala porowaty charakter masy. Gwałtowny spadek temperatury produktu w momencie opuszczania ekstrudera powoduje usztywnienie powstałej masy. W wyniku działania takich procesów w ekstrudowanym produkcie następuje (Ghorpade i in. 1997, Kokini i in. 1992, Mościcki 1999):

- rozerwanie błon komórkowych wewnątrz obrabianego surowca,
- kleikowanie skrobi,
- niszczenie składników antyżywnieniowych,
- podnoszenie jakości surowców,
- polepszenie strawności białka i skrobi,
- podniesienie trwałości,
- sterylizacja (przykładem jest niszczenie Salmonelli).

Proces obróbki ciśnieniowo-termicznej może odbywać się w ekstruderze jednoślimakowym lub dwuślimakowym. O wyborze rodzaju urządzenia decydują m.in.: fizyczne i sensoryczne cechy produktu finalnego, skład surowca, przeznaczenie produktu oraz wielkość produkcji. W praktyce koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne ekstrudera dwuślimakowego są wyższe, jednak te urządzenia mają lepszą zdolność do sterowania parametrami procesu oraz pozwalają uzyskać większą różnorodność produktu. Ekstrudery jednoślimakowe są przystosowane do pracy z surowcem o zawartości tłuszczu maksymalnie do 17%, ponieważ większa jego zawartość powoduje zmniejszenie tarcia wewnątrz materiału, co wpływa na mniejsze przetwarzanie energii mechanicznej na ciepłą, w wyniku czego produkt nie jest przetwarzany w wymaganej temperaturze. W ekstruderach dwuślimakowych istnieje możliwość ekstruzji surowców o zawartości tłuszczu nawet do 22% (Brent Jr. 1989, Dutkiewicz i Dowgiałło 2005, Grochowicz 1996).

Głównym elementem roboczym wszystkich ekstruderów jest ślimak (jeden lub dwa) oraz cylinder. W trakcie obróbki ciśnienie w cylindrze może dochodzić nawet do 20 MPa, a temperatura produktu wewnątrz cylindra do 200°C. Temperatura powstaje w wyniku tarcia materiału oraz poprzez umieszczone na obwodzie cylindra grzałki. Zakres zmian fizycznych i chemicznych w surowcu zależy od przyjętych parametrów procesu ekstruzji, jak również od konstrukcji ekstrudera (Mościcki i in. 2007, Grochowicz 1996).

2.2. Charakterystyka surowców paszowych poddawanych procesowi ekstruzji

W mieszankach paszowych głównym składnikiem są surowce pochodzenia roślinnego. Wśród szerokiej gamy surowców poddawanych procesowi ekstruzji do celów paszowych najpopularniejsza jest kukurydza i pszenica, które poddano dokładnej charakterystyce w dalszej części pracy.

Produkty otrzymywane w wyniku ekstruzji charakteryzują się wieloma zaletami, takimi jak trwałość, wysoka czystość mikrobiologiczna, porowatość i wodorochłonność oraz stosunkowo wysoki współczynnik strawności (Sensoy i in. 2005, Ekielski i in. 2006).

W procesie ekstruzji można przerabiać wiele różnych rodzajów surowców, których obróbka w innych procesach byłaby czasochłonna i energochłonna (np. gotowanie) (Chevanan i in. 2007, 2010, Dutkiewicz i Dowgiałło 2005, Ekielski i in. 2007, Mościcki 1999).

Wszystkie surowce roślinne, zbożowe poddawane obróbce ciśnieniowo-termicznej charakteryzują się specyficzną budową, w skład której wchodzi:

- Zarodek, który stanowi najważniejszą część ziarna, ponieważ jest załącznikiem przyszłej rośliny. Jego udział wynosi około 2-3% w pszenicy, życie,

jęczmieniu i owsie, natomiast w kukurydzy 10-14% masy ziarna. Jest bogatym źródłem białka, składników mineralnych i witamin.

- Bielmo, które stanowi największą część masy ziarna. W przypadku pszenicy i żyta udział bielma w masie ziarna wynosi 80-82%, dla kukurydzy 72-75%, owsa 50-52%. W bielmie wyróżnić można warstwę komórek aleuronowych i bielmo środkowe. Warstwa aleuronowa dostarcza zarodkowi składników odżywczych w czasie kiełkowania. Warstwa ta jest ściśle związana z okrywą nasienną i przy przemiale wyciągowym znaczna jej część przechodzi do otrąb. Bielmo środkowe spełnia funkcję tkanki zapasowej ziarna.
- Okrywa (łuska). Powstaje przez zrośnięcie okrywy owocowej utworzonej ze ścianek załączni z okrywą nasienną powstałą ze ścianek załączka. W okrywie owocowo-nasiennej wyróżnić można szereg warstw o różnym ułożeniu komórek. Ilość okrywy w ziarnie jest różna w zależności od odmiany i warunków zewnętrznych (Matyka i in. 1999).

Istotny dla obróbki ciśnieniowo-termicznej jest skład chemiczny obrabianych surowców, a w szczególności zawartość białka, tłuszczu i włókna. Skład chemiczny surowców paszowych nie jest stały. Najczęściej oznacza się: suchą masę, popiół, białko, tłuszcz, włókno surowe.

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny wybranych surowców roślinnych.

Tabela 1. Skład chemiczny wybranych zbóż (Matyka 2007)

Table 1. Chemical composition of selected grain (Matyka 2007)

Surowiec Raw material	Popiół surowy Crude ash	Białko ogólne Total protein	Tłuszcz surowy Crude fat	Włókno surowe Crude fibre	Skrobia Starch
(%)					
Pszenica – Wheat	1,8	11,9	2,0	2,9	59,4
Kukurydza – Maize	1,7	9,4	3,9	2,9	61,4
Owies – Oat	3,1	11,8	4,1	8,9	39,3
Jęczmień – Barley	2,7	11,0	2,1	4,8	52,3
Żyto – Rye	1,8	9,5	1,6	2,4	54,5

Kukurydza

Według systematyki botanicznej kukurydza należy do rodzaju *Zea* i do gatunku *Zea mays*. Jest rośliną jednopienną, o kłoskach rozdzielnopłciowych. Główne produkty przemiału kukurydzy to grys, kaszka i mąka, które wykorzystywane są w przemyśle spożywczym do produkcji m.in. płatków, chrupek i produktów bezglutenowych. Produkty uboczne kukurydzy, tj. makuchy, otręby, wysłodziny, są cenną paszą dla zwierząt (Gąsiorowski 2005, Niedziółka i Szymanek 2003).

Ziarno kukurydzy zawiera dużo łatwo-strawnych węglowodanów, a mało włókna, co powoduje, że ma najwyższą wartość energetyczną ze wszystkich zbóż uprawianych w Polsce. Posiada mało białka tj.: od 6 do 10%, o niskiej wartości biologicznej (mało aminokwasów egzogennych). Dawki pokarmowe z większym udziałem kukurydzy powinny być dokładnie bilansowane pod względem zawartości aminokwasów (Mościcki i in. 2007). Tłuszcz kukurydziany bogaty jest w witaminę E i ksantofile (barwniki), które nadają intensywne zabarwienie żółtku jaja kurzego i żółtawe zabarwienie skórce brojlera kurzego. Występują w nim również duże ilości nienasyconych kwasów tłuszczowych powodujących występowanie miękkości słoniny. Ziarno kukurydzy nie zawiera substancji antyodżywczych, jest smaczne i chętnie pobierane przez zwierzęta.

Kukurydza należy do surowców najczęściej poddawanych procesowi ekstruzji. Wśród jej odmian możemy wyróżnić kukurydze twarde (do produkcji płatków kukurydzianych) oraz miękkie (do produkcji mączek i kaszek). W składzie chemicznym kukurydzy występuje skrobia o wielkości ziarenek rzędu od 5 do 20 μm i zróżnicowanym kształcie, co z kolei jest uwarunkowane zawartością amylopektyny i amylozy. Coraz większą popularność zyskuje kukurydza cukrowa, której ziarniaki mają słodki smak oraz kukurydza typu „popcorn”, charakteryzująca się wysokim stopniem ekspandowania (Arámbula-Villa i in. 2007, Mościcki i in. 2007).

Pszenica

Rodzaj pszenicy (*Triticum*) obejmuje dużą liczbę gatunków oraz odmian botanicznych, które wykazują znaczne różnice morfologiczne, użytkowe oraz genetyczne. Ziarno pszenicy używane jest do celów spożywczych i paszowych. Białmo pszenicy może być szkliste lub mączyste, ziarno natomiast może być twarde albo miękkie, co ma duży wpływ na wartość przemiałową.

Jakość pszenicy (pszenica twarda, szklista lub mączysta) jest związana ściśle z kierunkiem użytkowania. Nie każda pszenica twarda nadaje się do tego samego celu (Jurga 2002). W przemyśle paszowym pszenica znajduje zastosowanie w żywieniu świń i drobiu ze względu na niską zawartość włókna surowego i wy-

soką strawność substancji organicznej. Zboże to stosowane w tuczu pozwala osiągnąć bardzo dobre przyrosty. Pszenica stanowi ulubioną paszę dla ptactwa, np. kur, gołębi (Chochułowa i Skomial 1994, Przegaliński 1969).

Pszenica jest pod względem popularności drugim surowcem poddawany najczęściej procesowi ekstruzji. Ziarenka skrobi zawartej w pszenicy, w zależności od odmiany, mają wielkość od 20 do 40 μm (typ A) lub od 1 do 10 μm (typ B). Natomiast zawartość białka jest większa niż w kukurydzy i wynosi w granicach od 8 do 15% i odpowiada za zdolność pochłaniania wody i elastyczność ciasta. Jednakże wysoka temperatura obróbki w ekstruderze może powodować niekorzystne przemiany chemiczne białka, np. głęboką denaturację i powstawanie zbyt dużej liczby produktów reakcji Maillarda, co prowadzi do znacznej utraty podstawowych aminokwasów i spadku wartości odżywczej produktu. Do innych wad stosowania pszenicy należy również obniżenie chrupkości finalnego produktu, mniejszy stopień ekspandowania oraz nadawanie produktom charakterystycznego mączystego posmaku (Mościcki i in. 2007).

2.3. Rola tłuszczu i aminokwasów w żywieniu zwierząt

Tłuszcz ma duże znaczenie w żywieniu zwierząt. Jest on ważnym składnikiem wszystkich komórek organizmu zwierzęcego. Występuje jako tłuszcz komórkowy, poza tym stanowi główną substancję rezerwową jako tłuszcz zapasowy, który najobficiej odkładany jest pod skórą oraz wokół niektórych narządów wewnętrznych. Należy do składników pokarmowych o najwyższej wartości energetycznej, bo 2,25 raza wyższej niż wartość węglowodanów. Z tego też powodu wartość energetyczna pasz jest zależna od jego zawartości (Friedman i Nylund 1980). W niektórych przypadkach potrzeby energetyczne zwierzęcia z pewnością mogą być pokryte węglowodanami, jednak gdy konieczne jest podanie małej ilości paszy, większa koncentracja tłuszczu jest nieodzowna. Dotyczy to szczególnie zwierząt młodych, szybko rosnących, które mają wysokie zapotrzebowanie na energię i składniki odżywcze, a równocześnie posiadają mało pojemny przewód pokarmowy. 1 gram tłuszczu daje 37,68-38,94 kJ energii, natomiast z cukru i białka otrzymuje się 17,17 kJ energii. Ilość dostarczonej energii przez tłuszcze nie tylko zależy od jego ilości, ale również od długości łańcucha i stopnia nasycenia kwasów tłuszczowych uczestniczących w budowie danego tłuszczu. W miarę zwiększania długości łańcucha zwiększa się wartość energetyczna, natomiast rosnąca liczba wiązań podwójnych zmniejsza wartość energetyczną (Jerocha i Lipiec 2012). Poza składem chemicznym tłuszczu o jego zastosowaniu w żywieniu decydują również cechy organoleptyczne, tj.: wygląd, zapach i smak. Wykorzystanie wysokotłuszczowych pasz lub dodatków tłuszczowych do pasz w żywieniu rosną-

cych świń, bydła, brojlerów zapewnia dobre przyrosty masy i poprawę zdrowotności zwierząt (Zhang i in. 2011, Lipiec i Pisarski 2010).

Tłuszcz zawarty w paszy wpływa korzystnie na wchłanianie witamin w nim rozpuszczalnych, między innymi witaminy A i karotenu. Tłuszcze zawierają w swoim składzie kwasy tłuszczowe, które naturalnie nie mogą być wytworzone w organizmie zwierzęcia i konieczne jest ich dostarczenie w paszy. Spośród nasyconych i nienasyconych kwasów tłuszczowych w tłuszczach roślinnych i zwierzęcych spotyka się w największych ilościach kwasy: palmitynowy, stearynowy, oleinowy, linolowy i linolenowy (Seong-Koon i in. 2008). Pomiedzy tłuszczami zwierzęcymi a roślinnymi nie ma istotnych różnic w budowie chemicznej, natomiast różnią się stosunkiem występujących w nich kwasów tłuszczowych. Tłuszcze roślinne zawierają kwasy o niskim punkcie topliwości, dlatego większość tłuszczów roślinnych w temperaturze pokojowej jest płynna i nazywana jest olejami. Natomiast w tłuszczach zwierzęcych jest więcej kwasu palmitynowego i stearynowego, z tego powodu mają one wyższy punkt topnienia i występują zazwyczaj w stanie stałym (Ruszczyc 1983). Wyjątkiem w tłuszczach roślinnych jest m.in. olej palmowy, a w tłuszczach zwierzęcych - tran. Tłuszcze roślinne i zwierzęce różnią się także między sobą zawartością witamin w nich rozpuszczalnych. W tłuszczach roślinnych znajduje się dużo witaminy E, natomiast prawie nie ma witaminy A i D. W tłuszczach zwierzęcych jest bardzo mało witaminy E, a są one dobrym źródłem witamin A i D (Bockish 1998). Pasze zawierające większą ilość tłuszczu mają zwykle wysoką wartość odżywczą, co jest spowodowane nie tylko wysoką wartością energetyczną tłuszczu, ale również jego dużą strawnością.

Wysoka zawartość tłuszczu w paszy nie jest jednak zawsze korzystna, np.: w paszach dla trzody chlewnej wyższa zawartość tłuszczu roślinnego może powodować zmękczenie słoniny i pogarszać jakość tuszy. Jednak w żywieniu młodych świń granica wielkości dodatku tłuszczowego, bez negatywnych późniejszych następstw na jakość tusz, jest znacznie wyższa aniżeli u tuczników w końcowej fazie tuczu. Przyjmuje się, że prawidłowo zbilansowane dawki pokarmowe nie powinny zawierać więcej niż 4% dodanego tłuszczu (Matyka 1997, Jamroz i in. 2006).

Dodatek tłuszczu do mieszanek dla bydła wykorzystuje się w odchowie cieląt przy stosowaniu mleka odtłuszczonego i przy produkcji preparatów mlekozastępczych. Aplikując odpowiednie tłuszcze tzw. „chronione”, zabezpieczone przed uwodorowaniem, można modyfikować skład kwasów tłuszczowych tłuszczu mleka (żywność dietetyczna). Dla dorosłych przeżuwaczy udział dodatków tłuszczowych w paszach nie powinien przekraczać 5% (Matyka 1997).

Mieszanki pełnoporcjowe dla drobiu charakteryzują się wyższą zawartością tłuszczu w stosunku do mieszanek dla bydła lub trzody. Przykładowy skład analityczny mieszanki drobiowej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny mieszanki drobiowej wg Ekoplón S.A.

Table 2. Chemical composition of chicken feed mixture according to Ekoplón S.A.

Składnik – Component	Zawartość – Content (%)
Białko – Protein	21
Włókno – Fibre	3,5
Tłuszcz – Fat	8,5
Popiół – Ash	5,5
Lizyna – Lysine	1,5
Metionina – Methionine	0,6
Wapń – Calcium	1,0
Sód – Sodium	0,15
Fosfor – Phosphorus	0,6

Liczne badania naukowe oraz praktyka żywieniowa wskazują, że w celu prawidłowego zbilansowania mieszanek paszowych dla kurcząt brojlerów i indyków niezbędny jest dodatek tłuszczu. W mieszkach sypkich udział tłuszczu dochodzi nawet do 12%, jednak w przypadku pasz granulowanych jego ilość jest podyktowana czynnikami technologicznymi. Najlepszymi dodatkami tłuszczowymi dla drobiu są oleje roślinne, w tym bezerukowy olej rzepakowy lub wystandaryzowane mieszaniny tłuszczów zwierzęcych i roślinnych, dostosowane do możliwości trawiennych drobiu (Matyka 1997).

Współcześnie każdy technolog – producent pasz analizuje i optymalizuje zawartość podstawowych składników pokarmowych, tj.: energii, wapnia, fosforu i koncentrację aminokwasów egzogennych. Ma to szczególne znaczenie w żywieniu drobiu i trzody, którym należy zapewnić właściwe stosunki energetyczno-aminokwasowe oraz odpowiednie wzajemne porcje aminokwasów egzogennych. Poza tłuszczami podstawą bilansowania receptur przemysłowych mieszanek paszowych są aminokwasy, dobierane przy zastosowaniu następujących kryteriów:

- aminokwasy egzogenne muszą być obecne w mieszance paszowej w takich stosunkach i koncentracji, jakie określa zapotrzebowanie zwierząt na te składniki,

- zapotrzebowanie zwierząt na aminokwasy jest niezależne od składu surowcowego mieszanek paszowych,
- specyficzne i niekorzystne oddziaływanie poszczególnych materiałów paszowych na jakość mieszanek jest minimalizowane przez stosowanie tzw. „granicznych udziałów”.

I tak np. w żywieniu świń zainteresowanie składem aminokwasowym białka ogranicza się do 5 aminokwasów, tj.: lizyny, metioniny z cystyną, treoniny i tryptofanu (Kasprowicz-Potocka 2011). Ich bilansowanie uważa się za niezbędny element przygotowania prawidłowej dawki żywieniowej dla trzody chlewnej. Wybrane aminokwasy stanowią tylko część z 20 aminokwasów wchodzących w skład białka zwierzęcego (Matyka 1997).

Do najważniejszych czynników technologicznych warunkujących przyswajalność aminokwasów przez zwierzęta należy: rodzaj i warunki obróbki ciśnieniowo-termicznej surowców lub mieszanek, stopień rozdrobnienia surowców, jakość wymieszania, stopień aglomeracji (Matyka 2004). Czynniki technologiczne ograniczające przyswajalność aminokwasów są zazwyczaj kontrolowane lub niezmiennie w danej wytwórni pasz i mogą być uwzględniane w recepturze paszowej.

2.4. Metody natłuszczania pasz – różne koncepcje

Popularne surowce paszowe zawierają niewiele tłuszczu. Jego obecność w zielonkach waha się od 0,3 do 1%, w sianie niewiele ponad 1,5%, podobnie w słomie i kiszonkach. Nieco więcej tłuszczu zawierają ziarna zbóż i nasiona (tab. 1). Z krajowych roślin strączkowych najwięcej tłuszczu posiada łubin – 6-8%, natomiast nasiona roślin oleistych zawierają ponad 25% oleju, jednak w większości wymagają wstępnego przetworzenia, aby mogły być dodawane do paszy. Popularnymi składnikami pochodzenia roślinnego wzbogacającymi pasze w tłuszcze są odpadki powstające przy produkcji oleju, np.: makuchy.

Przed wyborem metody natłuszczania należy poznać właściwości danego tłuszczu. Stosowane tłuszcze utylizacyjne i odpadowe pochodzenia zwierzęcego mają konsystencję stałą i w procesie technologicznym muszą być podgrzane do temperatury 50-60°C w celu ich upłynnienia. Mniejsze kłopoty natomiast występują przy stosowaniu tłuszczów roślinnych i rybnych, których temperatura krzepnięcia jest dużo niższa, a po podgrzaniu zmieniają swoją lepkość, co poprawia efektywność natłuszczania.

W przemyśle paszowym dodawanie tłuszczu do mieszanek paszowych może odbywać się na różnych etapach produkcyjnych, tj.:

- dodawanie tłuszczu do mieszarki głównej,
- dodawanie tłuszczu do specjalistycznej mieszarki przelotowej,
- dodawanie tłuszczu do kondycjonera granuladora lub ekspandera,
- natłuszczanie gotowego granulatu lub ekspandatu,

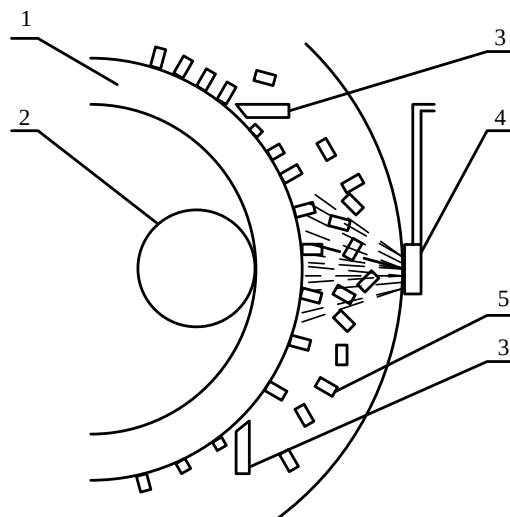
- natłuszczenie mieszanki poprzez stosowanie jako komponentu koncentratu tłuszczowego (Zawiślak 1997).

Dodatek tłuszczu do mieszarki głównej podczas mieszania jest metodą najprostszą i najmniej kosztowną, jednak ilość tłuszczu jaki możemy wprowadzić do mieszanki, waha się w granicach od 3 do 7%. Większy dodatek tłuszczu na tym etapie natłuszczania nie może być stosowany ze względu na jakość, a w szczególności wytrzymałość kinetyczną otrzymywanego granulatu. Technologia natłuszczania w mieszarce głównej polega na dostarczaniu rurociągiem rozgrzanego do temperatury 50–60°C tłuszczu i natryskiwaniu na mieszankę przez dysze rozpylające. W trakcie mieszania surowiec wchłania dostarczany tłuszcz. Maksymalna ilość dodawanego tłuszczu do mieszanki tą metodą wynosi 7%. Powyżej tej bariery mieszanka zbryla się i okleja elementy robocze mieszarki (Grochowicz 1996).

Inną metodą jest stosowanie do natłuszczania mieszarek przelotowych o dużych obrotach mieszadeł, które pozwalają otrzymać mieszankę bardziej jednorodną i o wyższej zawartości tłuszczu. W tym celu wytworzoną mieszankę sypką przepuszcza się przez mieszarkę przepływową, do której wtryskiwany jest rozgrzany tłuszcz. Duże obroty mieszadła, z reguły łopatkowego, pozwalają na stworzenie większej powierzchni aktywnej mieszanki, co ma duży wpływ na ułatwienie wchłonięcia rozpylonego tłuszczu (Grochowicz 1996, Zawiślak 1997).

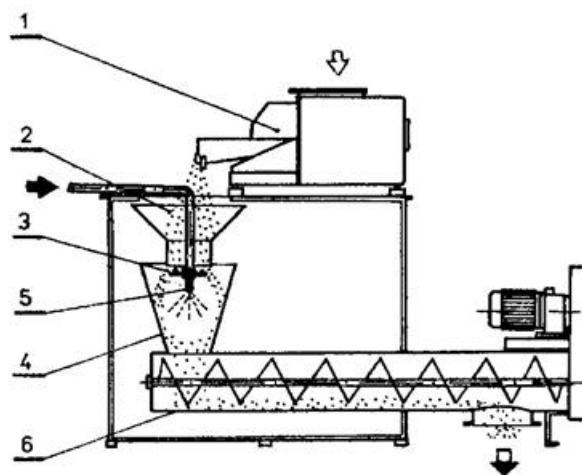
Postęp techniczny w produkcji pasz przemysłowych polega głównie na doskonaleniu realizacji poszczególnych etapów produkcyjnych, a szczególnie maszyn. Technologia produkcji, zależnie od formy końcowego produktu, obejmuje wszystkie lub część operacji. Największe znaczenie w produkcji pasz o podwyższonej zawartości tłuszczu ma etap dozowania. Operacja ta obejmuje zarówno dozowanie składników sypkich, jak i płynnych. Płynny komponent mieszanki, czyli w tym przypadku tłuszcz, może być natryskiwany w różnych urządzeniach, tj.: bezpośrednio na otrzymywany granulát (rys. 1) poprzez dysze rozpraszające w systemie ze stożkiem rozpraszającym granulát (rys. 2 i 3) lub przy opadaniu z wykorzystaniem przenośnika taśmowego (rys. 4), albo może być dozowany w powlekarce (rys. 5.) (Grochowicz 1996, 2001, Zawiślak 1997).

Zaletą dozowania tłuszczu bezpośrednio na granulát opuszczający matrycę granulatora jest wysoka temperatura produktu, wynosząca ponad 80°C, co ułatwia wnikanie cząsteczek tłuszczu. Konieczne jest jednak odpowiednie wyposażenie granulatora w układ dozujący tłuszcz płynny oraz umieszczenie dyszy w okolicach matrycy granulatora. Wadą natomiast jest to, że nie wchłonięty tłuszcz będzie oblepiał matrycę granulatora oraz łączył się z cząsteczkami niezgranulowanymi tworząc półpłynną maź, która może osadzać się na powierzchni roboczej urządzenia.



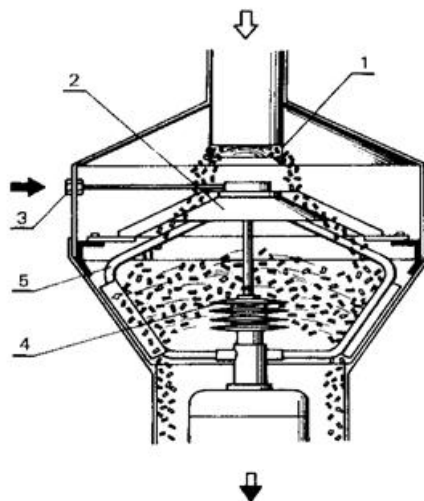
Rys. 1. Natryskiwanie tłuszczu na matrycę: 1 – matryca, 2 – rolka, 3 – nóż, 4 – głowica natryskująca tłuszcz, 5 – granulat (rysunek własny)

Fig. 1. Fat spraying onto die: 1 – die, 2 – roller, 3 – cutter, 4 – fat spraying head, 5 – pellet (own drawing)



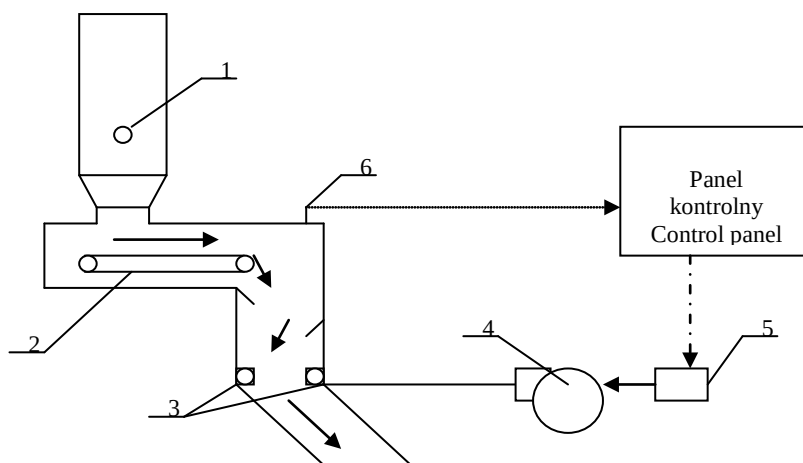
Rys. 2. Schemat urządzenia do nanoszenia tłuszczu na gotowy produkt (Zawiślak 1997): 1 – dozownik mieszanki, 2 – mieszanka, 3 – tarcza rozdzielająca mieszankę, 4 – stożek wlotu do przenośnika, 5 – dysza rozpylająca, 6 – urządzenie transportujące

Fig. 2. Schematic diagram of device for applying fat on the finished product (Zawiślak 1997): 1 – mixture feeder, 2 – mixture, 3 – separating shield of the mixture, 4 – inlet cone to the conveyor, 5 – spray nozzle, 6 – conveyor



Rys. 3. System natłuszczania Rotospray (Zawiślak 1997): 1 – regulowana szczelina pierścieniowa wlotu granulat, 2 – stożek rozpraszający granulat, 3 – króciec przewodu tłuszczowego, 4 – tarczowy dozownik spryskiwaczy, 5 – wirnik z łopatkami zwiększający równomierność pokrycia powierzchni granulat, 6 – dmuchawa rozpylająca

Fig. 3. Rotospray greasing system (Zawiślak 1997): 1 – adjustable ring gap of pellet intake, 2 – cone distributing the pellets, 3 – fat line connector pipe, 4 – disc feeder of sprayers, 5 – impeller increasing the uniformity of pellets surface coverage, 6 – spray fan



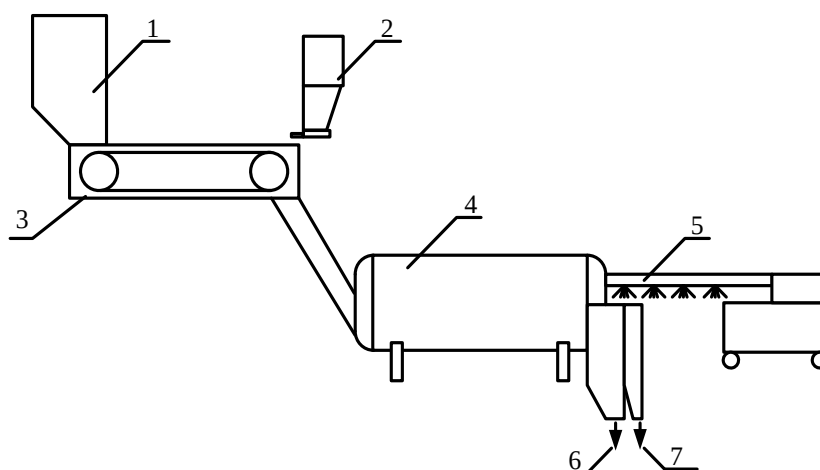
Rys. 4. Urządzenie do natryskiwania granulatu z przenośnikiem taśmowym: 1 – kontrola poziomu granulatu, 2 – przenośnik taśmowy z wagą, 3 – dysze rozpraszające, 4 – pompa, 5 – przekaźnik, 6 – przekaźnik obciążenia (rysunek własny)

Fig. 4. Device for pellets spraying, with a belt conveyor: 1 – pellet level control, 2 – belt conveyor with scales, 3 – diffusing nozzles, 4 – pump, 5 – relay, 6 – load relay (own drawing)

Systemy natłuszczania wykorzystujące stożek rozpraszający granulatu w przepływie charakteryzują się wysoką wydajnością natłuszczania, jednak dodatkowe urządzenia mogą powodować uszkodzanie granulatu.

Interesującym rozwiązaniem nanoszenia substancji, również i tłuszczu, jest system z przenośnikiem taśmowym lub powlekarką bębnową. Przenośnik często służy również jako system ważący. Po przejściu produktu przez przenośnik granulki opadają i trafiają na rozproszony tłuszcz z dysz natryskowych umieszczonych na obwodzie. Następnie tłuszcz jest wchłaniany do wnętrza struktury granulatu (rys. 4).

Podobnie działa również system z obrotową powlekarką bębnową, do wnętrza której jest doprowadzany rozgrzany tłuszcz przez dysze natryskujące (rys. 5). Jednak ilość wchłanianego w ten sposób tłuszczu jest niewielka i dlatego często takie metody są stosowane jako dodatkowo wzbogacające granulaty w tłuszcz.



Rys. 5. Powlekarka z bębnem: 1 – kosz zasypowy, 2 – dodatek witamin i aromatów, 3 – podajnik, 4 – bęben powlekarki, 5 – przesuwana lanca, 6 – granulat, 7 – materiał zbrylony (rysunek własny)

Fig. 5. Coating drum: 1 – charging hopper, 2 – addition of vitamins and flavours, 3 – feeder, 4 – coater drum, 5 – sliding lance, 6 – pellets, 7 – agglomerated material (own drawing)

Istotnym etapem produkcyjnym, mającym szczególne znaczenie w produkcji pasz o zwiększonej zawartości tłuszczu, jest proces mieszania (Grochowicz 1996, 2001). W ostatnich kilku latach na rynku pojawiły się mieszarki próżniowe, w których w warunkach podciśnienia wtryskuje się dodatek ciekły (głównie tłuszcz), który po dekompresji wciskany jest w odpowietrzone wcześniej pory w cząstkach materiału sypkiego.

Istnieje wiele nowoczesnych rozwiązań kondycjonerów, które ułatwiają wprowadzenie komponentów płynnych. Podczas kondycjonowania w mieszance ma miejsce wiele procesów, takich jak: nawilżanie, ogrzewanie, mieszanie, modyfikacja pH, a równocześnie istnieje możliwość doprowadzenia do kondycjonera barwników, substancji smakowych lipidów i nawet pulpy mięsnej – jak to ma miejsce przy produkcji karmy dla zwierząt towarzyszących (domowych) (Dutkiewicz i Dowgiałło 2005, Kulig i Laskowski 2002, 2005).

W liniach produkcyjnych pasz granulowanych stosuje się często dwuetapowe wprowadzanie dodatku tłuszczu. Pierwsze odbywa się na etapie mieszania w mieszarce, a drugie tuż przed granulowaniem w kondycjonerze. Takie rozwiązanie zapewnia lepsze wchłonięcie tłuszczu do składników sypkich mieszanki (Grochowicz 2001, Kulig i in. 2011).

W budowie granulatorów w większości doskonalone są tylko systemy regulacji i sterowania. Dotyczy to m.in. wyposażenia na szerszą skalę hydraulicznego systemu regulacji ustawienia rolek względem matrycy, systemu kontroli poślizgu rolek, układu natrysku tłuszczu na granulaty wychodzący z matrycy, a także opracowania systemu automatycznego sterowania procesem granulowania.

Powszechnie wiadomo, że tłuszcz dodawany do granulowanych mieszanek powoduje zwiększenie wydajności granulatora, ale jednocześnie może wpływać na zmniejszenie wytrzymałości granulatu, czemu można przeciwdziałać stosując grubsze matryce (Grochowicz 1996). Prowadzono również wiele badań nad granulowaniem pasz dla drobiu z udziałem całych ziaren pszenicy, pszenżyta lub owsa. Metoda wprowadzania całych ziaren eliminuje energochłonny proces rozdrabniania i poprawia energochłonność produkcji granulatu (Soszka 2011). W takich mieszankach można również stosować różne metody wprowadzania tłuszczu, co nie wpływa na jakość produkowanych pasz (Michaelsen i Heidenreich 1997).

2.5. Charakterystyka materiałów porowatych

Wiele materiałów pochodzenia naturalnego i technicznie przetworzonych posiada w swej budowie wewnętrznej dużą liczbę pustych przestrzeni o wielkości względnie małej w porównaniu z wymiarem charakterystycznym samego ciała. Przestrzenie takie, niezależnie od ich kształtu i wymiarów, nazywane są porami, a materiały, w których one występują – materiałami porowatymi. Wzajemnie połączone pory tworzą w materiale porowatym przestrzeń porową, przeważnie wypełnioną płynem lub powietrzem. Część stałą takich materiałów nazywa się szkieletem. W zależności od stopnia połączenia porów między sobą oraz z otoczeniem rozróżnia się pory przelotowe, nieprzelotowe (ślepe) i zamknięte. Przepływ cieczy i gazów możliwy jest tylko w porach otwartych, które są połączone

między sobą i z powierzchnią materiału. Oznacza to, że materiał zawierający pory otwarte jest przepuszczalny dla cieczy i gazów. Drugi rodzaj porów to pory zamknięte. Pory zamknięte, to pory izolowane, niepołączone między sobą. Ze względu na rodzaj występujących w materiale porów możemy wyróżnić:

- Porowatość otwartą (P_o) – jest to, wyrażony w procentach, stosunek objętości otwartych porów próbki do objętości próbki łącznie ze wszystkimi jej porami.
- Porowatość całkowitą (P_c) – jest to, wyrażony w procentach, stosunek całkowitej objętości porów próbki (otwartych i zamkniętych) do objętości próbki łącznie ze wszystkimi jej porami.
- Porowatość zamkniętą (P_z) – to różnica między porowatością całkowitą i otwartą.

Istnieje również pojęcie porowatości aktywnej definiowanej jako objętość porów przelotowych, przez które może zachodzić przepływ płynów (Zogzas i in. 1994).

Niezależnie od składu chemicznego i rodzaju materiałów porowatych różniących się własnościami fizycznymi, wspólną cechą takich materiałów jest wewnętrzna struktura wzajemnie połączonych porów. Do najważniejszych parametrów charakteryzujących strukturę materiałów porowatych należą:

- porowatość objętościowa (całkowita),
- przepuszczalność,
- powierzchnia właściwa.

Porowatość objętościowa definiowana jest jako stosunek objętości porów V_p zawartych w próbce materiału porowatego do całkowitej objętości próbki V , którą możemy zapisać wg następującego wzoru:

$$P_c = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

Objętość całkowita próbki V jest łączną objętością porów oraz objętością szkieletu łączącego pory, więc:

$$V_p + V_s = V \quad (2)$$

V_s – objętość szkieletu,

a więc porowatość całkowita objętościowa wynosi:

$$P_c = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}. \quad (3)$$

W porach przepływowi płynu towarzyszyć mogą zjawiska wymiany ciepła, filtracji, dyfuzji, sorpcji a także reakcji chemicznych (Lisowa i in. 1976). Porowatość na ogół charakteryzuje się poprzez podanie ilości i średnicy porów oraz opis ich rozmieszczenia w badanej przestrzeni próbki. Najczęściej właściwości te są oznaczane metodą porozymetrii rtęciowej lub poprzez analizę obrazu utrwalonej struktury, np. przy pomocy żywicy lub stopu Wood'a (Konstankiewicz i in. 1998, Czachor 2005, 2008). Możliwe jest również wyznaczenie objętościowego udziału fazy gazowej w odniesieniu do objętości całej badanej próbki, czyli określenie wartości współczynnika porowatości (Pazdro 1983). Dotyczy to materiałów będących w stanie rozdrobnienia (np. siewki, trawy, słomy), materiałów o strukturze włóknistej (wytwory włókiennicze) oraz mas skalnych (Žák i Bain 1988, Leśnikowski 2002).

Kolejnym charakterystycznym parametrem materiałów porowatych jest przepuszczalność, czyli zdolność materiału do przepuszczania cieczy i gazów przez przestrzeń porową pod wpływem różnicy ciśnień. Przepuszczalność z kolei w dużym stopniu zależy od powierzchni właściwej, która jest definiowana jako stosunek pola powierzchni wewnętrznej porów zawartych w próbce materiału porowatego do objętości tej próbki. Powierzchnia właściwa należy do ważnych cech przepuszczalnych materiałów porowatych, decyduje bowiem o przebiegu tych procesów, dla których wielkość rozwinięcia powierzchni porów ma podstawowe znaczenie (np. sorbenty, katalizatory, wypełniacze jonowe, izolacje cieplne).

Znając powierzchnię właściwą materiału porowatego, możemy również wyznaczyć tzw. porowatość powierzchniową (P_p), czyli:

$$P_p = \frac{A_p}{A} \quad (4)$$

A_p – powierzchnia porów w przekroju,

A – powierzchnia całego przekroju.

Wiedząc, że powierzchnię przekroju całkowitego stanowi powierzchnia porów oraz powierzchnia szkieletu A_s , możemy zapisać:

$$A = A_p + A_s \quad (5)$$

czyli:

$$P_p = \frac{A_p}{A_p + A_s} \quad (6)$$

Z wartością porowatości ściśle skorelowana jest gęstość materiału. Mała gęstość materiału świadczy o dużej porowatości i odwrotnie. Badania nad zmianą współczynnika porowatości w zależności od gęstości materiału na przykładzie rehydracji suszu, potwierdzające taką zależność, przeprowadziła Witrowa-Rajchert (2003).

2.6. Teoretyczna analiza wnikania tłuszczu w materiał porowaty

Teoretyczną analizę wnikania tłuszczu w materiał porowaty należy rozpocząć od wyznaczenia prędkości przepływu ośrodka przez materiał porowaty, która opisana jest prawem Darcy'ego. W związku z tym, prędkość przepływu płynu w ośrodku porowatym u jest wprost proporcjonalna do spadku ciśnienia przypadającego na jednostkę miąższości ośrodka $\Delta P/L$ i odwrotnie proporcjonalna do lepkości przepływającego płynu μ , a współczynnik proporcjonalności, zwany przepuszczalnością K ; jest parametrem stałym, charakterystycznym dla danego ośrodka porowatego:

$$u = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{l} \quad (7)$$

Następnie korzystając z równania Darcy-Weisbacha, które opisuje spadek ciśnienia płynu na skutek oporów jego przepływu w teoretycznym przewodzie, należy zapisać:

$$\Delta P = \lambda \frac{Lu^2}{d2g} \quad (8)$$

gdzie:

ΔP – wysokość strat ciśnienia. Zmniejszenie ciśnienia wyrażone jako zmniejszenie wysokości słupa cieczy (m),

λ – współczynnik oporu – $f(\text{Re})$,

L – długość przewodu,

d – średnica przewodu,

u – prędkość płynu,

g – przyspieszenie ziemskie.

Uwzględniając opory lokalne i gęstość płynu należy zapisać:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \rho \quad (9)$$

ρ – gęstość płynu.

Współczynnik oporu λ uzależniony jest od liczby Reynoldsa, którą możemy zapisać równaniem:

$$\text{Re} = \frac{ud\rho}{\mu} \quad (10)$$

Wówczas dla przekrojów kołowych:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{64}{\text{Re}} && \text{dla } \text{Re} < 2100 \\ \lambda &= \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} && \text{dla } 3 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5 \\ \lambda &= 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} && \text{dla } 10^5 < \text{Re} < 10^8 \end{aligned}$$

W 1952 roku Ergun na podstawie badań eksperymentalnych materiałów o porowatości ε wyznaczył formułę zależności współczynnika oporu i porowatości:

$$\lambda(\text{Re}, \varepsilon) = 150 \frac{1 - \varepsilon}{\text{Re}} + 1,75 \quad (11)$$

Wnikanie cieczy do materiałów porowatych uzależnione jest od wymiarów i kształtu porów oraz ich rozkładu wewnątrz materiału. Rozpoczyna się ono od powierzchni materiału, po czym przenosi się w głąb struktury włóknistej. Rozprzestrzenianie się cieczy na powierzchni materiału zależy od kąta zwilżenia, na wartość którego wpływa rodzaj materiału oraz jego chropowatość (Akgiray i Saatçi 2001, Moutinho i in. 2007).

Ostatnim etapem wnikania cieczy jest penetracja kapilarna. Według Niskane-na (1998) należy zapisać ją równaniem Lukas-Washburna:

$$h^2 = \left(\frac{r\gamma \cos \theta}{2\eta} \right) \cdot t \quad (12)$$

gdzie:

- h – droga penetracji,
- r – promień kapilary,
- γ – napięcie powierzchniowe,
- θ – kąt zwilżania,
- η – lepkość cieczy,
- t – czas penetracji.

W przypadku zerowego ciśnienia penetracja kapilarna wymaga zwilżania oraz rozprzestrzeniania się zwilżania w kapilarach. W przypadku wnikania cieczy pod zwiększonym ciśnieniem we wzorze należy uwzględnić wartość ciśnienia (Sko-
wroński 2010).

2.7. Podsumowanie przeglądu literatury

Z analizy danych literaturowych wynika, że dotychczasowe prace badawcze koncentrowały się głównie na metodach wprowadzania tłuszczu do mieszanki lub gotowego granulatu poprzez rozwiązania konstrukcyjne maszyn, lub metod natłuszczania (np.: natłuszczanie przez dysze, natłuszczanie w kondycjonerze). Wiele badań naukowych wykonano pod względem wytrzymałości granulatu po różnym dodatku tłuszczu, zarówno ilościowym, jak i w zależności od metody natłuszczania (Angulo i in. 1995, Kulig i Laskowski 2005, Soevik 1998, Zawislak i in. 2010, Zhang i in. 2011). Prowadzono również prace naukowe związane z energochłonnością procesu granulowania oraz jakością granulatu przy zróżnicowanym składzie surowcowym (Kulig i Laskowski 2006, Wojdalski i in. 1998, Zawislak i in. 2010a, Zawislak 1996). Znane są również metody wprowadzania tłuszczu do granulatu na nośnikach sypkich. Do tego celu stosowane były m.in. żel krzemionkowy, wycierka ziemniaczana czy koncentrat na bazie rozdrobnionych nasion tytoniu (Berbeć i in. 1980). Prowadzono również badania nad produkcją koncentratów sypkich opartych na mieszance różnych surowców. W skład takich mieszanek wchodziły m.in. otręby pszenne, śruta kukurydziana, susz z zielonek, drożdże pastewne i tłuszcz. Wadą takich koncentratów jest konieczność posiadania wielu surowców do ich produkcji oraz rozszerzony proces technologiczny. Niektóre z wytworzonych koncentratów tłuszczowych nie nadają się do mieszanek drobiowych ze względu na wysoką zawartość włókna.

Tendencja czy wręcz konieczność wprowadzania na rynek nowych, dobrych jakościowo produktów wymusza potrzebę poszukiwania takich metod i sposobów obróbki surowców, które pozwolą realizować wyzwania stawiane przez rynek lub konkurencję.

Jak wykazały badania wstępne oraz przegląd dotychczasowej literatury, surowce poddane obróbce ciśnieniowo-termicznej charakteryzują się wysokim stopniem ekspandowania oraz wysoką porowatością (Altan i in. 2008, Arhaliass i in. 2009, Bhattacharya i Hanna 1987, Brnčić i in. 2006, 2011, Case i in. 1992, Desrumaux i in. 1998). Badania nad wpływem różnych dodatków roślinnych do kaszki kukurydzianej nie spowodowały zmiany właściwości fizycznych otrzymanego ekstrudatu (Sobczak 2003). Stanowi on doskonały materiał do dalszego procesu, a przetwarzane surowce roślinne są podstawowym składnikiem mieszanek paszowych (Klocek 1997). Stąd też w założeniach pracy uwzględniony został dobór różnych etapów

przetwarzania ekstrudatu w kontekście otrzymania produktu o wysokiej zawartości tłuszczu, a jednocześnie nadającego się do łatwego dozowania i mieszania w mieszarkach paszowych.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy było określenie wpływu obróbki ciśnieniowo-termicznej na efektywność procesu natłuszczania otrzymanych ekstrudatów zbożowych. Sprecyzowany cel pracy realizowano przez analizę wybranych właściwości fizycznych ekstrudatu, określenie ich zmian pod kątem wnikania tłuszczu i ocenę możliwości wykorzystania tak zmodyfikowanego surowca w przemyśle paszowym.

Na podstawie wyników badań wstępnych i analizy literatury sformułowano następujące hipotezy robocze:

Hipoteza 1

Obróbka pszenicy i kukurydzy metodą ekstruzji umożliwi wchłonięcie minimum 20% tłuszczu płynnego, przy czym powstała zmiana właściwości fizycznych nie wpłynie na sypkość uzyskanego koncentratu.

Hipoteza 2

Zastosowane metody obróbki ciśnieniowo-termicznej surowców roślinnych oraz ich dalsze przetworzenie winny wskazywać kierunki i potwierdzić utylitarne możliwości wykorzystania tych technik w przemyśle paszowym.

Realizacja celu badań oraz weryfikacja postawionych hipotez wymagały przeprowadzenia szeregu badań obejmujących:

- dobór parametrów procesu ekstruzji śruty kukurydzianej oraz pszennej pod kątem wysokiego stopnia ekspandowania,
- analiza właściwości fizycznych otrzymanego ekstrudatu pod kątem wnikania tłuszczu,
- natłuszczanie ekstrudatów:
 - w ciśnieniu atmosferycznym,
 - w warunkach podciśnienia,
- ocena zawartości tłuszczu,
- ocena procesu granulowania mieszanki drobiowej z dodatkiem koncentratów tłuszczowych uzyskanych na bazie kukurydzy i pszenicy.

Na podstawie uzyskanych wyników badań w tym zakresie weryfikowano, oceniano i potwierdzano przydatność uzyskanego produktu jako dodatku tłuszczowego do mieszanek paszowych.

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Wybór materiału doświadczalnego

Wybór najlepszego materiału do dalszych badań opierał się na weryfikacji istniejących receptur paszowych oraz na badaniach wstępnych z wykorzystaniem różnych surowców roślinnych. Przyjęto, że surowiec powinien posiadać wysoki stopień ekspandowania po procesie ekstruzji, co zapewni lepsze wchłonięcie tłuszczu. Po przeanalizowaniu szeregu receptur paszowych realizowanych m. in. w Wytwórni Koncentratów i Mieszanek Paszowych „Agropol” oraz „Ekoplon”, stwierdzono, że najczęściej występującym surowcem jest kukurydza i pszenica. Badania wstępne nad obróbką ciśnieniowo-termiczną tych surowców potwierdziły ich przydatność do dalszego przetwarzania.

W przedstawionych recepturach paszowych dla drobiu (tab. 3) pszenica i kukurydza stanowi ponad 60% składu recepturowego. Do mieszanek dodawany był tłuszcz w postaci płynnej na etapie mieszania w ilości około 3%, natomiast pozostały tłuszcz trafiał do mieszanki przed granulowaniem w procesie kondycjonowania. Takie rozwiązanie pozwala na równomierne wchłonięcie tłuszczu w całej mieszance.

Tabela 3. Skład surowcowy wybranych mieszanek paszowych (wg Ekoplon, Agropol)

Table 3. Composition of selected feed mixtures (according to the Ekoplon, Agropol)

Nazwa mieszanki Type of mixture	Skład surowcowy Composition	Udział procentowy Percentage content
Brojler 2 (mieszanka pełnoporcjowa) Broiler 2 (complete mixture)	Pszenica – Wheat grain	39,1
	Kukurydza – Maize	25,0
	Śruta poekstrakcyjna sojowa – Post-extraction soy meal	16,9
	Makuch rzepakowy – Rapeseed cake	10,0
	Olej roślinny – Vegetable oil	2,0
	Tłuszcz drobiowy – Poultry fat	2,0
	Śruta słonecznikowa – Sunflower meal	1,5
	Dodatki – Additives	3,5
Brojler 3 (mieszanka pełnoporcjowa) Broiler 3 (complete mixture)	Pszenica – Wheat grain	39,3
	Kukurydza – Maize	25,0
	Śruta poekstrakcyjna sojowa – Post-extraction soy meal	14,5
	Makuch rzepakowy – Rapeseed cake	12,0
	Olej roślinny – Vegetable oil	4,9
	Śruta słonecznikowa – Sunflower meal	1,5
	Dodatki – Additives	2,8

Tabela 3 c.d. Skład surowcowy wybranych mieszanek paszowych (wg Ekoplón, Agropol)
Table 3. Cont. Composition of selected feed mixtures (according to the Ekoplón, Agropol)

Nazwa mieszanki Type of mixture	Skład surowcowy Composition	Udział procentowy Percentage content
Indyk (mieszanka pełnoporcjowa) Turkey (complete mixture)	Pszenica – Wheat grain	35,4
	Kukurydza – Maize	25,0
	Śruta poekstrakcyjna sojowa – Post-extraction soy meal	23,1
	Śruta rzepakowa – Rapeseed meal	7,0
	Olej roślinny – Vegetable oil	5,4
	Dodatki – Additives	4,1
Brojler (mieszanka pełnoporcjowa) Broiler (complete mixture)	Pszenica – Wheat grain	37,5
	Kukurydza – Maize	25,0
	Śruta poekstrakcyjna sojowa – Post-extraction soy meal	17,8
	Tłuszcz drobiowy – Poultry fat	3,3
	Olej roślinny – Vegetable oil	2,0
	Śruta rzepakowa – Rapeseed meal	10,0
	Śruta słonecznikowa – Sunflower meal	1,5
	Dodatki – Additives	2,9

4.2. Badania wstępne

Badania wstępne polegały na przygotowaniu i doborze poszczególnych parametrów obróbki ziarna pszenicy oraz kukurydzy i obejmowały następujące operacje:

- ekstruzję surowców,
- rozdrobnienie ekstrudatów,
- podział na poszczególne frakcje.

Ekstruzję przeprowadzono za pomocą dwóch ekstruderów, tj. za pomocą ekstrudera jednoślimakowego S-45 o L/D – 16/1 oraz ekstrudera dwuślimakowego 2S9/5 przeciwbieżnego o L/D-12/1. Producentem urządzeń jest ZMCH Metalchem w Gliwicach. Badania wykonano w Katedrze Inżynierii Procesowej i Katedrze Inżynierii i Maszyn Spożywczych w Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie w latach 2011 i 2012.

Kolejnym etapem przygotowującym surowiec do dalszych badań było rozdrobnienie przygotowanych wcześniej ekstrudatów pszenicznych oraz kukurydzianych. Badania te przeprowadzono za pomocą kruszarki do granulatu oraz rozdrabniacza bijakowego. Do badań wstępnych przyjęto następujące parametry rozdrabniania dla poszczególnych urządzeń (tab. 4).

Tabela 4. Parametry urządzeń rozdrabniających ekstrudaty
Table 4. Parameters of disintegrator devices for extrudates

Parametr – Parameter	Kruszarka – Crumbler	Rozdrabniacz bijakowy Hammer mill
Szczelina między wałami Gap between rollers	1,0 mm	–
	1,5 mm	
	2,0 mm	
	3,0 mm	
Średnica oczek w sicie Screen mesh size	–	2,0 mm 4,0 mm

Przygotowany w ten sposób materiał stanowił półprodukt do przeprowadzania dalszych badań. Ekstrudaty podzielono na 3 frakcje o następujących wymiarach cząsteczek: do 1 mm; od 1 do 2,5 mm; powyżej 2,5 mm.

Rozdział na poszczególne frakcje został wykonany na separatorze sitowym, wibracyjnym marki Retsch AS200 przy amplitudzie drgań równej 2 mm oraz czasie przesiewania wynoszącym 3 minuty.

4.3. Ocena wybranych właściwości fizycznych

Ocenę sypkości oraz charakterystykę surowca określano przez pomiar następujących właściwości fizycznych: wilgotność, kąt zsyphu po blasze stalowej, kąt usypu, gęstość usypowa, gęstość utrząsiona.

Badania zostały wykonane według następujących norm:

- oznaczanie wilgotności PN-EN ISO 712:2009,
- kąt zsyphu PN-65/Z-04005,
- kąt usypu PN-73/R-74007,
- gęstość w stanie zsypanym PN-EN ISO 7971-1:2010,
- gęstość utrząsiona PN-EN ISO 8460:1999.

4.4. Pomiar zawartości tłuszczu

Zawartość tłuszczu oznaczono metodą ekstrakcyjno-wagową (AACC, Method 20-26). Próbkę o masie 3 g poddawano ekstrakcji heksanem w aparacie Soxhlet HT-6. Oznaczenie wykonano w trzech powtórzeniach dla każdej próby.

Metoda Soxhleta oznaczenia tłuszczu polegała na ekstrakcji substancji tłuszczowych z badanej próby przy użyciu heksanu i wagowym oznaczeniu ilości ekstraktu po odparowaniu substancji rozpuszczającej.

Analizy wykonano w Centralnym Laboratorium Agroekologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.

4.5. Badanie tekstury porowatej metodą porozymetrii rtęciowej

Porozymetria rtęciowa oparta jest na penetracji rtęci pod ciśnieniem w pory badanego materiału. Pozwala to na mierzenie szerokiego zakresu porów, obejmującego makropory i mezopory (Lipiec i in. 2012, Hajnos i in. 2006). Z powodu znacznego napięcia powierzchniowego rtęć nie zwilża powierzchni materiałów i w konsekwencji w porach tworzy się menisk wypukły. Do wejścia rtęci do porów potrzebne jest ciśnienie hydrostatyczne p_1 , większe niż ciśnienie par w porach (nad meniskiem) p_0 . Różnica ciśnień $\Delta p = p_1 - p_0$ potrzebna do wtłoczenia rtęci do porów jest proporcjonalna do promienia porów r , zgodnie z równaniem Washburna, przy założeniu cylindrycznych, nieprzecinających się porów:

$$\Delta p = -\frac{2\gamma \cos \theta_1}{r} \quad (13)$$

W porozymetrii rtęciowej objętość rtęci penetrującej mierzono jako funkcję zastosowanego ciśnienia. Przed pomiarem próbka była dokładnie ewakuowana, tak, że ciśnienie p_0 można pominąć (ponieważ $p_1 \gg p_0$) i przyjąć we wzorze Washburna, że $\Delta p = p_1$. Równanie wynika z porównania sił działających w kapilarach cylindrycznych. W stanie równowagi siła działająca z zewnątrz na przekrój kapilary $\pi r^2 p_2$ jest równoważona siłą napięcia powierzchniowego wzdłuż obwodu kapilary równą $-2\pi r \gamma \cos \theta_1$.

$$\pi r^2 p_2 = -2\pi r \gamma \cos \theta_1 \quad (14)$$

stąd:

$$r = \frac{-2\gamma \cos \theta_1}{p_2} \quad (15)$$

Przyjmując napięcie powierzchniowe $\gamma = 485 \text{ nN}\cdot\text{m}^{-1}$, kąt zwilżania $\theta_1 = 130^\circ$ oraz cylindryczny kształt porów otrzymujemy zależność:

$$r = \frac{623,5}{p_2} \quad (16)$$

Proporcjonalność promieni porów do działającego ciśnienia spełniona jest przy założeniach, że:

- pory mają kształt cylindryczny,
- napięcie powierzchniowe i kąt zwilżania są stałe podczas analizy,
- materiał stały nie ulega deformacji pod wpływem ciśnienia (nie zmienia się struktura porowata w czasie analizy).

Analizę wykonano w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie w Zakładzie Fizykochemii Materiałów Porowatych.

4.6. Badanie porowatości za pomocą niskotemperaturowej adsorpcji azotu

Pomiar powierzchni właściwej, objętości mezoporów i średniej średnicy mezoporów przeprowadzono za pomocą aparatu ASAP 2405 (Micromeritics Inc., USA).

Pomiary obejmowały wyznaczenie izotermy adsorpcji azotu o wysokiej czystości w temperaturze ciekłego azotu BET (Brunauer i in. 1938). Równanie izotermy adsorpcji polimolekularnej BET ma postać:

$$\frac{p}{V(p_o - p)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{c-1}{V_m c} \cdot \frac{p}{p_o} \quad (17)$$

Powierzchnię właściwą S_{BET} wyliczono według wzoru (Gregg i Sing 1967):

$$S_{BET} = \frac{V_m \cdot N_A \cdot a_m}{M \cdot V_L} (m^2 \cdot g^{-1}) \quad (18)$$

Objętość, powierzchnię i średnie średnice mezoporów wyznaczono stosując metodę BJH (Barett i in. 1951), której podstawą obliczeń jest równanie Kelvina (przy założeniu cylindrycznych porów):

$$\ln \frac{p_o'}{p'} = -\frac{2\gamma V_L}{rRT} \cos \theta \quad (19)$$

Wykonanie oznaczenia:

Przed pomiarami próbki suszono oraz odgazowywano w próżni pod ciśnieniem 0,133 Pa w temperaturze 100°C, przepłukując je czystym helem. Następnie próbka umieszczana była w tubie pomiarowej i poddawana działaniu analizowanego gazu (azotu). Dla każdego, sukcesywnie wzrastającego ciśnienia, wzrastała również liczba cząsteczek gazu zaadsorbowanych na powierzchni adsorbentu. Zapełniane są mikropory, tworzy się warstwa adsorbentu na powierzchni i przebiega proces kondensacji kapilarnej w mezoporach. W dalszej kolejności w procesie desorpcji następuje zmniejszenie ciśnienia powodujące zmniejszenie ilości zaadsorbowanych cząsteczek. W oparciu o dane uzyskane w fazie adsorpcji wyliczono powierzchnię właściwą S_{BET} w pięciu pomiarach w zakresie ciśnień względnych od ok. 8 do ok. 26,6 Pa, a także objętość i powierzchnię całkowitą mezoporów (w zakresie średnic 1,7-300 nm). Uzyskane wyniki są średnią z trzech powtórzeń.

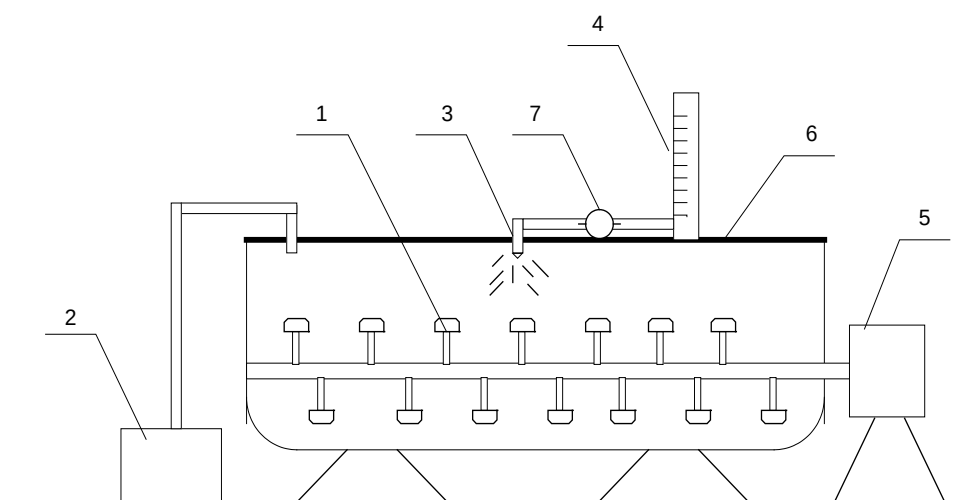
Analizę wykonano w Laboratorium Analitycznym Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie.

4.7. Pomiar średnicy porów metodą zdjęć mikroskopowych

Ocenę średnicy powstałych porów w wyniku obróbki ciśnieniowo-termicznej dokonano przy użyciu mikroskopu typu Olympus CX41. Spośród rozdzielonych na poszczególne frakcje ekstrudatów wybrano losowo 12 prób i wykonano zdjęcia mikroskopowe aparatem Olympus Camedia C5060, a następnie przy użyciu programu Olympus DP-Soft zmierzono średnicę wewnętrznych kanalików powietrznych.

4.8. Sposób natłuszczenia surowca

Natłuszczenie ekstrudatów przeprowadzono w mieszarce łopatkowej w ciśnieniu atmosferycznym oraz w podciśnieniu. Przygotowaną wcześniej frakcję surowca ważono i wsypywano do mieszarki. Następnie odmierzano wagowo ilość oleju, która stanowiła 30% masy przygotowanego surowca i wlewano olej do cylindra, skąd przy użyciu pompy dozowany był do mieszarki. Przed waniem oleju do cylindra podgrzewano go do temperatury 70°C w celu zmniejszenia lepkości.



Rys. 6. Schemat stanowiska do natłuszczenia: 1 – wał mieszarki z łopatkami, 2 – pompa próżniowa, 3 – dysza natryskowa, 4 – cylinder pomiarowy, 5 – silnik mieszarki, 6 – hermetyczna pokrywa, 7 – pompa
Fig. 6. Schematic diagram of greasing stand: 1 – shaft of mixer with paddles, 2 – vacuum pump, 3 – spray nozzle, 4 – measuring cylinder 5 – engine, 6 – hermetic lid, 7 – pump

Proces dozowania odbywał się za pomocą dyszy natryskowej wprowadzonej do wnętrza mieszarki (rys. 6). Przyjęto stały stopień wypełnienia mieszarki surowcem wynoszący 70% objętości. Proces natłuszczenia w warunkach podciśnienia prze-

prowadzano po uzyskaniu ciśnienia wewnątrz mieszarki równego 500 hPa, co wynikało z możliwości konstrukcyjnych urządzenia. Istotnym parametrem w procesie mieszania i natłuszczania jest czas. Czas natłuszczania dobierano eksperymentalnie za pomocą oceny stopnia wymieszania przy użyciu mikrowskaźników, w ten sposób, aby wymieszany surowiec był możliwie jak najbardziej jednorodny. Badania prowadzono zgodnie ze Standardem ASAE (nr S303), opisującym procedury badania efektów mieszania. Zgodnie z tą procedurą do mieszarki dodaje się mikrowskaźniki w ilości 50 g na tonę surowca, a następnie po założonym czasie mieszania pobiera 10 prób i wyznacza współczynnik zmienności CV wg następującego wzoru:

$$CV = \frac{S_y}{y} \cdot 100\% \quad (20)$$

4.9. Granulowanie z dodatkiem koncentratów tłuszczowych

Do oceny procesu granulowania wybrano mieszanek drobiową, którą następnie podzielono na cztery próby, tj.:

- mieszanek bez dodatku tłuszczu (próba kontrolna),
- mieszanek natłuszczaną olejem sojowym w mieszarce,
- mieszanek bez oleju sojowego, z dodatkiem wyprodukowanego koncentratu tłuszczowego na bazie kukurydzy,
- mieszanek bez oleju sojowego, z dodatkiem wyprodukowanego koncentratu tłuszczowego na bazie pszenicy.

Każda z prób ważyła 40 kg, przy czym oleju sojowego dodawano 2 kg, a koncentratu tłuszczowego 10 kg.

W tabeli 5 przedstawiono skład surowcowy mieszanek poddanych procesowi granulowania.

Mieszanek drobiowa miała następujące właściwości fizyczne: wilgotność – 14%, gęstość usypowa – $667,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, gęstość utrząsiona – $709,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt usypu – 38° kąt zsypania – 25° , średni wymiar cząsteczki – 1,004 mm.

Proces granulowania przeprowadzono na linii do granulowania firmy Munch RMP 250, charakteryzującej się następującymi parametrami układu granulującego: stopień sprężania matrycy (stosunek długości otworu w matrycy do jego średnicy) – 15, ilość nacięć w rolce 48 wykonane równolegle do osi rolki, liczba rolek 2. Para do procesu kondycjonowania była wytwarzana w wytwornicy pary typu LW 81 o wydajności $45 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ i ciśnieniu 0,5 MPa.

Tabela 5. Skład surowcowy badanych mieszanek (udziały w %)
Table 5. Composition of tested mixtures (%)

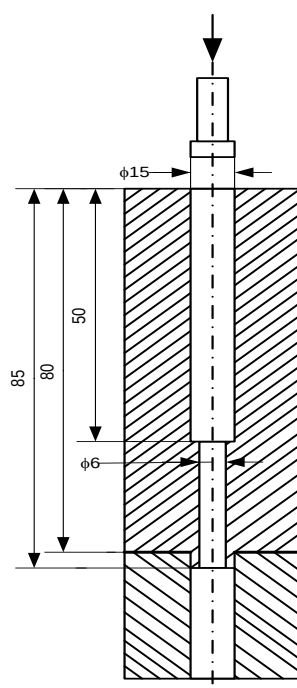
Surowiec Material	Próba kontrolna Control sample	Mieszanka z dodatkiem tłuszczu płynnego Mixture with liquid fat addition	Mieszanka z dodatkiem koncentratu tłuszczowego na bazie kukurydzy Mixture with corn-based concentrated fat addition	Mieszanka z dodatkiem koncentratu tłuszczowego na bazie pszenicy Mixture with wheat-based concentrated fat addition
Pszenica – Wheat	41,1	39,1	43,1	18,1
Kukurydza – Maize	27,0	25,0	–	25,0
Koncentrat tłuszczowy na bazie kukurydzy Corn-based concentrated fat	–	–	25,0	–
Koncentrat tłuszczowy na bazie pszenicy Wheat-based concentrated fat	–	–	–	25,0
Śruta poekstrakcyjna sojowa Post-extraction soy meal	16,9	16,9	16,9	16,9
Makuch rzepakowy Rapeseed cake	10,0	10,0	10,0	10,0
Olej sojowy – Soy oil	–	4,0	–	–
Śruta słonecznikowa Sunflower meal	1,5	1,5	1,5	1,5
Dodatki – Additives	3,5	3,5	3,5	3,5

Otrzymany granulát poddano badaniom jakościowym, określając wytrzymałość kinetyczną metodą Pfosta zgodnie z PN-R-64834:1998 oraz wyznaczono zawartość tłuszczu w poszczególnych granulatach.

Pobór mocy w procesie granulowania mierzono za pomocą układu pomiarowego składającego się z: przetwornika typu Lumel PP83, karty PCL 711B i komputera PC. Dawało to możliwość zapisu w wersji elektronicznej wyników rejestracji zmierzonej mocy chwilowej.

Badania stanowiskowe polegające na pomiarze siły wytłaczania mieszanek przez pojedynczy otwór matrycy wykonano na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 7. Stosunek L/D na wykonanym stanowisku badawczym wynosił 5,8, przy średnicy otworu 6 mm. Do oznaczenia przygotowywano próbki o jednakowej masie 1,6 g, co stanowiło całkowite wypełnienie komory otworu.

Zaprojektowane stanowisko umieszczano w standardowym urządzeniu do pomiaru tekstury typu Instron, w którym istnieje możliwość ciągłego rejestrowania siły wytłaczającej.



Rys. 7. Stanowisko do pomiaru siły wytłaczającej
Fig. 7. Stand for extrusion force measurement

4.10. Analiza statystyczna wyników badań

Uzyskane wyniki z poszczególnych etapów badań poddano analizie statystycznej, która umożliwiła określenie parametrów obróbki i przetwarzania kukurydzy i pszenicy jako dodatku wzbogacającego mieszankę paszową w tłuszcz. Obliczenia statystyczne obejmowały obliczanie wartości średnich, błędów i odchyłeń standardowych oraz 95% przedziałów ufności dla badanych wielkości. Na wybranych wykresach przedstawiono wyniki analizy istotności różnic (test Tukey'a) pomiędzy średnimi wartościami. Jednorodność wariancji testowano testem Cochra; w przypadku wariancji niejednorodnych zastosowano statystyki nieparametryczne przeprowadzając test Kruskala-Wallisa. Wszystkie analizy statystyczne wykonano przy wykorzystaniu standardowych procedur zawartych w programie Statistica 6.0, przyjmując za każdym razem poziom istotności $\alpha = 0,05$.

5. WYNIKI BADAŃ

Przedstawione w tym rozdziale wyniki badań zostały podzielone na cztery podgrupy charakteryzujące poszczególne etapy badań, tj.:

1. Przygotowanie surowca do procesu natłuszczenia.
2. Porowatość i wymiary porów.
3. Ocena procesu natłuszczenia oraz charakterystyka koncentratu tłuszczowego.
4. Ocena procesu granulowania oraz charakterystyka granulatu z dodatkiem wytworzonego koncentratu tłuszczowego.

5.1. Przygotowanie surowca do procesu natłuszczenia

Przedstawione wyniki badań obejmują zakres zmian wybranych właściwości fizycznych w wyniku obróbki ciśnieniowo-termicznej kukurydzy i pszenicy. Dobór parametrów ekstruzji polegał na przeprowadzeniu szeregu badań wstępnych przy zmiennej prędkości obrotowej ślimaka, średnicy otworów w ustniku oraz zmiennych temperaturach sekcji grzewczych w ekstuderze. Najkorzystniejsze parametry procesu ekstruzji pod kątem ich dalszego zastosowania w zakresie produkcji zbożowo-tłuszczowego koncentratu paszowego przedstawiono w tabeli 6.

Prezentowane parametry ekstruzji dla wybranych surowców różnią się w zależności od surowca wejściowego, a głównym tego powodem są wymiary ziarenek skrobi oraz ich zróżnicowanie.

W wyniku procesu ekstruzji przy parametrach przedstawionych w tabeli 6 uzyskano materiał o wysokim stopniu ekspandowania (tab. 7).

Tabela 6. Parametry procesu ekstruzji
Table 6. Parameters of extrusion cooking process

Próba Sample	Temperatura Temperature (°C)				Obroty – Rotation speed (obr.·min ⁻¹) (rev.·min ⁻¹)	Wydajność Efficiency (kg·h ⁻¹)	Obciążenie – Load (A)	Uwagi Comments
	Głowica – Head	Pierwsza sekcja First section	Druga sekcja Second section	Produkt – Product				
Śruta kukurydziana Corn meal	135	140	144	89	125	32,4	14	Ekstruder jednoślakowy, liczba otworów w ustniku 1 o średnicy 3 mm (1 x 3 mm) One-shaft extruder, number of holes in mouthpiece 1 with diameter of 3 mm
Śruta pszenna Wheat grain meal	160	140	160	90	100	30,1	9	Ekstruder dwuślakowy, liczba otworów 2, średnica 3 mm Two-shaft extruder, number of holes in mouthpiece 2 with diameter of 3 mm

Tabela 7. Stopień ekspandowania produktów po ekstruzji
Table 7. Degree of the extrudate expansion

Parametr – Parameter	Kukurydza Maize	Pszenna Wheat grain
Średnica ekstrudatu Extrudate diameter	15,12 mm ± 0,41	10,11 mm ± 0,31
Średnica otworu w ustniku Mouthpiece hole diameter	3 mm	2 x 3 mm
Stopień ekspandowania Expansion degree	504%	337%

Kukurydza należy do ziarna, które najczęściej poddawane jest obróbce ciśnieniowo-termicznej do celów spożywczych (np. chrupki kukurydziane) ze względu na wysoki stopień ekspandowania. Dla pszenicy natomiast wysoki stopień ekspandowania uzyskano po zastosowaniu większego ciśnienia w ekstruderze dwuślimakowym. Proces ekstruzji różnych surowców roślinnych z zastosowaniem ekstruderów dwuślimakowych analizowali m.in. Fletcher i in. (1985), Kirby i in. (1988), Padmanabhan i Bhattachayrya (1989), którzy w swoich badaniach uzyskali podobne zależności.

Otrzymane ekstrudaty poddano rozdrobnieniu na mniejsze frakcje. Proces rozdrabniania przeprowadzono za pomocą kruszarki do granulatu firmy Münch oraz rozdrabniacza bijakowego.

W tabeli 8 przedstawiono rozkład procentowy poszczególnych frakcji w zależności od szerokości szczeliny pomiędzy walcami kruszarki.

Tabela 8. Udział procentowy poszczególnych frakcji w zależności od szerokości szczeliny między wałami kruszarki

Table 8. Percentage of particular fractions depending on the gap between the crumbler shafts

Surowiec Material	Frakcja Fraction	Szerokość szczeliny – Gap between rollers (mm)			
		1	1,5	2	3
Ekstrudat kukurydziany Corn extrudates	0-1	58,1	50	44	35,4
	1-2,5	32,9	31	25,7	13,7
	ponad 2,5 above 2.5	9	19	31,3	50,9
Ekstrudat pszenny Wheat extrudates	0-1	50,52	41,4	23,5	21,9
	1-2,5	35,23	40,8	29,7	20,8
	ponad 2,5 above 2.5	9,61	17,8	46,8	57,3

W badanym zakresie szerokości szczeliny najlepszy pod względem równomierności podział frakcji uzyskano stosując szczelinę o szerokości 2 mm, którą następnie przyjęto globalnie do rozdrabniania surowca.

Proces rozdrabniania ekstrudatów przeprowadzono również za pomocą rozdrabniacza z zastosowaniem sita o średnicy otworów 2 i 4 mm. Wyniki rozdziału na poszczególne frakcje przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Udział procentowy poszczególnych frakcji przy rozdrabnianiu bijakowym z zastosowaniem sita o średnicy otworów 2 i 4 mm

Table 9. Percentage of particular fractions after disintegration on the hammer mill with sieve of mesh size of 2 and 4 mm

Surowiec/Frakcja Material/Fraction	Kukurydza – Maize		Pszenica – Wheat grain	
	Sito 2 mm Screen 2 mm	Sito 4 mm Screen 4 mm	Sito 2 mm Screen 2 mm	Sito 4 mm Screen 4 mm
Ponad 2,5 mm Above 2.5 mm	8,9	46,8	10,6	57,3
1-2,5 mm	33,0	29,7	27,3	20,8
0-1 mm	58,1	23,5	62,0	21,9

W wyniku rozdrabniania ekstrudatu z zastosowaniem sit o średnicy otworów 2 mm uzyskano duży udział frakcji drobnej. Wpływ na udział poszczególnych frakcji miało zastosowane sito w rozdrabniaczu oraz kruchość ekstrudatu, co powodowało duże zróżnicowanie w rozkładzie granulometrycznym. Rozdrobnienie z zastosowaniem sita o średnicy otworów 4 mm spowodowało, że udział frakcji najdrobniejszej (poniżej 1 mm) zmniejszył się o 50% w porównaniu z rozdrabnianiem przy użyciu sita o średnicy otworów 2 mm. Największy udział stanowiła frakcja o wymiarze cząsteczek powyżej 2,5 mm. Podobne zależności na przykładzie rozdrabniania ziarna pszenicy uzyskali inni autorzy (Anderson 1994, Dziki i Laskowski 2010).

Właściwości fizyczne

Wyznaczenie poszczególnych właściwości fizycznych surowców wiązało się z koniecznością charakterystyki surowca, która miała wpływ m.in. na przetwarzanie, przechowywanie, podatność na uszkodzenia, czy też na projektowanie i dobór urządzeń do obróbki. Wartości liczbowe poszczególnych właściwości w licznych publikacjach bardzo często są rozbieżne i nieporównywalne. Tłumaczyć to można biologicznym pochodzeniem surowców i wynikającą z tego ich zmiennością (Thomas i in. 1997).

W celu porównania wpływu obróbki ciśnieniowo-termicznej na proces natłuszczania i wnikania tłuszczu przeprowadzono badania na śrucie pszennej i kukurydzianej niepoddanej procesowi ekstruzji. Śrutę po rozdrobnieniu podzielono

na trzy frakcje o identycznych wymiarach jak uzyskane ekstrudaty. Właściwości fizyczne charakteryzujące materiał poddany badaniom przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Właściwości fizyczne surowców przed procesem ekstruzji z podziałem na frakcje
Table 10. Physical properties of raw materials before extrusion cooking process, divided into fractions

Surowiec Material	Frakcja Fraction (mm)	Wilgotność Moisture content (%)	Gęstość usypowa Bulk density (kg·m ⁻³)	Gęstość utrząsiona Shaken density (kg·m ⁻³)	Kąt zsypu Chute angle (°)	Kąt usypu Angle of repose (°)
Śruta kukurydziana Corn meal	0-1	14,37	533,68	597,41	44	39
	1-2,5		613,36	644,69	34	33,7
	pow. 2,5 above 2.5		600,72	626,87	28	28,8
Śruta pszenna Wheat grain meal	0-1	9,67	514,4	566,09	42	36,2
	1-2,5		650,32	679,32	32	29,5
	pow. 2,5 above 2.5		711,2	740,17	25	28,8

Tabela 11. Właściwości fizyczne surowców po ekstruzji w zależności od frakcji
Table 11. Physical properties of extrudates depending on the fraction size

Surowiec Material	Frakcja Fraction (mm)	Wilgotność Moisture content (%)	Gęstość usypowa Bulk density (kg·m ⁻³)	Gęstość utrząsiona Shaken density (kg·m ⁻³)	Kąt zsypu Chute angle (°)	Kąt usypu Angle of repose (°)
Ekstrudat kukurydziany Corn extrudates	0-1	6,96	185,14	211,9	56	45
	1-2,5		84,06	94,1	40	40
	pow. 2,5 above 2.5		60,20	65,7	35	35
Ekstrudat pszenny Wheat grain extrudates	0-1	8,45	294,92	336,1	44	41
	1-2,5		204,70	224,2	35	37
	pow. 2,5 above 2.5		195,60	219,3	31	33

Rozdrobniony surowiec po podziale na frakcje posiadał zróżnicowaną gęstość usypową, która była zależna od wymiarów cząsteczek.

Właściwości fizyczne ekstrudatów wytworzonych z badanych surowców, przedstawione w tabeli 11, zmieniły się w stosunku do surowców przed ekstruzją. W wyniku obróbki ciśnieniowo-termicznej gęstość materiału zmniejszyła się dla niektórych surowców nawet 10-krotnie. Charakterystyczna jest również zmiana kąta zsypania i usypu, które po procesie ekstruzji wzrosły, co świadczyło o zmianie struktury materiału. W wyniku procesu ekstruzji nastąpił wzrost tarcia międzycząsteczkowego oraz tarcia zewnętrznego.

Wnioski etapowe:

1. Wysoki stopień ekspandowania w ekstruderze jednoślismakowym uzyskano jedynie dla kukurydzy. Dla pszenicy konieczna była ekstruzja na ekstruderze dwuślismakowym, co pozwoliło uzyskać stopień ekspandowania ponad 300%.
2. Rozdrabnianie ekstrudatu na rozdrabniaczu bijakowym z sitem o średnicy otworów 2 mm powoduje powstawanie dużej ilości frakcji o średnicy cząsteczek poniżej 1 mm. Zastosowanie „większego sita”, tj. o średnicy oczek 4 mm pozwala na uzyskanie pożądanego rozkładu granulometrycznego produktu.
3. Podobny rozkład ilościowy poszczególnych frakcji uzyskano w kruszarce przy szerokości szczeliny między wałkami 1,5 mm.
4. Obróbka ciśnieniowo-termiczna wpłynęła na zmianę właściwości fizycznych surowca, tj.: gęstości, kąta zsypania i usypu. Zmiana ta zależy od rodzaju materiału poddawanego procesowi ekstruzji.

5.2. Porowatość i wymiary porów

5.2.1. Pomiar porowatości metodą porozymetrii rtęciowej

Analizę wykonano na porozymetrze rtęciowym firmy Micrometrics model Autopore IV 9500, w zakresie ciśnień 0,0036–413 MPa i wymiarze promieni porów od 1,55 nm do 182 μm . Badaniu porowatości poddano próbkę rozdrobnionej kukurydzy i pszenicy przed procesem ekstruzji oraz próbki po ekstruzji rozdzielone na poszczególne frakcje (patrz tab. 11). Zebrane wyniki analizy porowatości przedstawiono w tabeli 12.

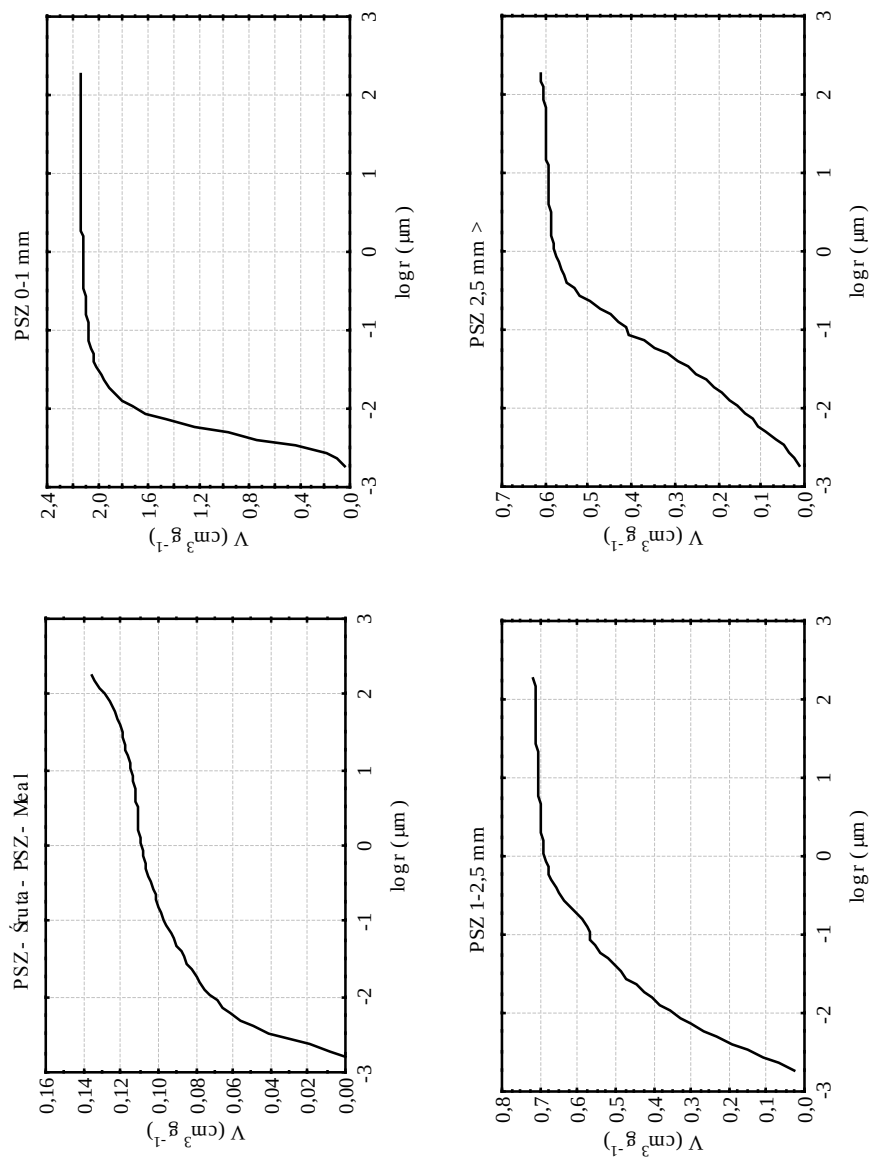
Zastosowany aparat rejestrował objętość rtęci wnikałej do porów badanego materiału, co umożliwiło przedstawienie krzywej zależności objętości porów otwartych od stosowanego ciśnienia i rozkładu objętości porów w zależności od promienia. Promienie porów odpowiadające określonym wartościom ciśnień obli-

czane były ze wzoru 16. Ze względu na duży rozrzut wartości ciśnienia i promieni porów, wyniki przedstawiono w układzie logarytmicznym.

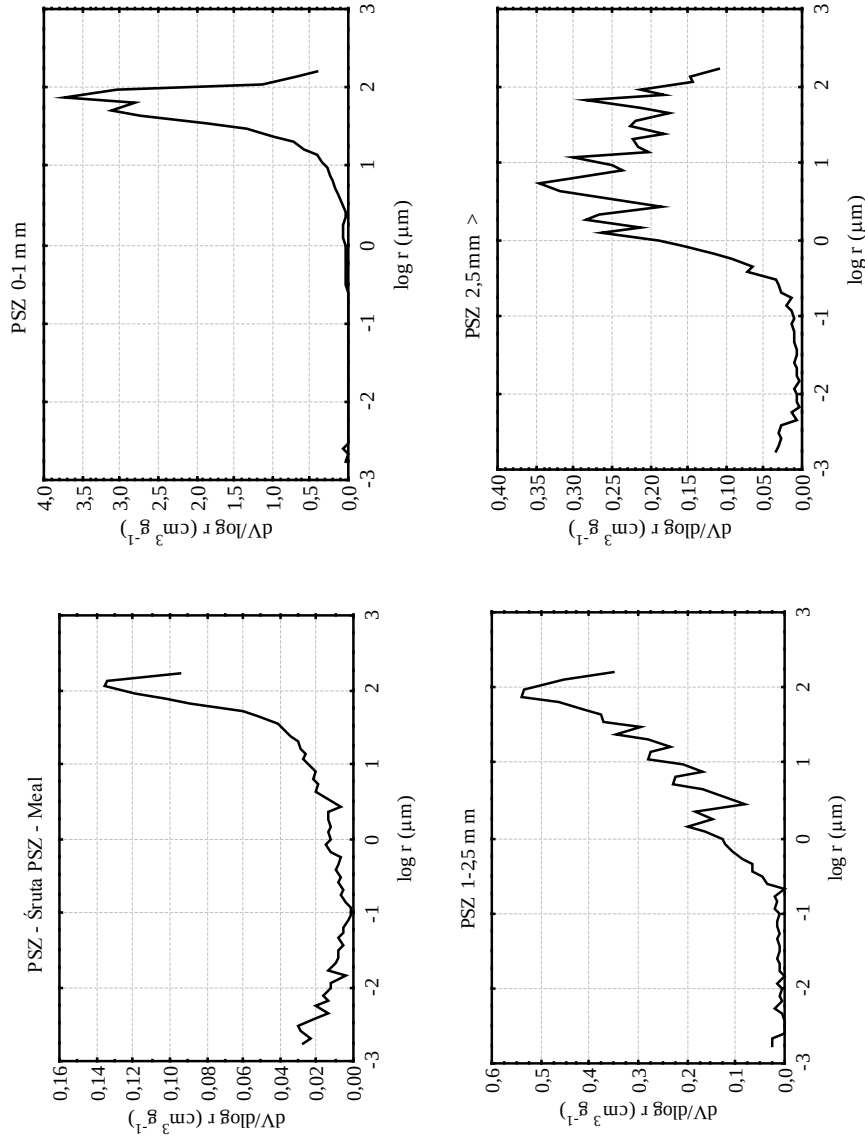
Tabela 12. Wyniki analizy porowatości wykonanych metodą porozymetrii rtęciowej
Table 12. Results of porosity analysis by mercury porosimeter method

Próba Sample	Objętość wtłoczonej rtęci Total intrusion volume (cm ³ ·g ⁻¹)	Powierzchnia porów Total pore area (m ² ·g ⁻¹)	Średni wymiar porów Average pore diameter (nm)	Gęstość właściwa przy ciśnieniu 3,6 kPa Bulk density at 3,6 kPa (g·cm ⁻³)	Porowatość całkowita Total porosity (%)
PSZ – śruta PSZ – meal	0,135	11,764	46,2	1,215	16,50
PSZ 0-1	2,141	9,372	913,9	0,345	73,93
PSZ 1-2,5	0,717	7,414	387	0,702	50,38
PSZ 2,5	0,612	12,601	194,5	0,751	46,01
KUK – śruta KUK – meal	0,188	14,759	51,1	1,169	22,02
KUK 0-1	3,373	4,508	2993,4	0,242	81,49
KUK 1-2,5	1,225	4,074	1203,7	0,524	64,29
KUK 2,5	2,450	1,748	5608,9	0,311	76,19

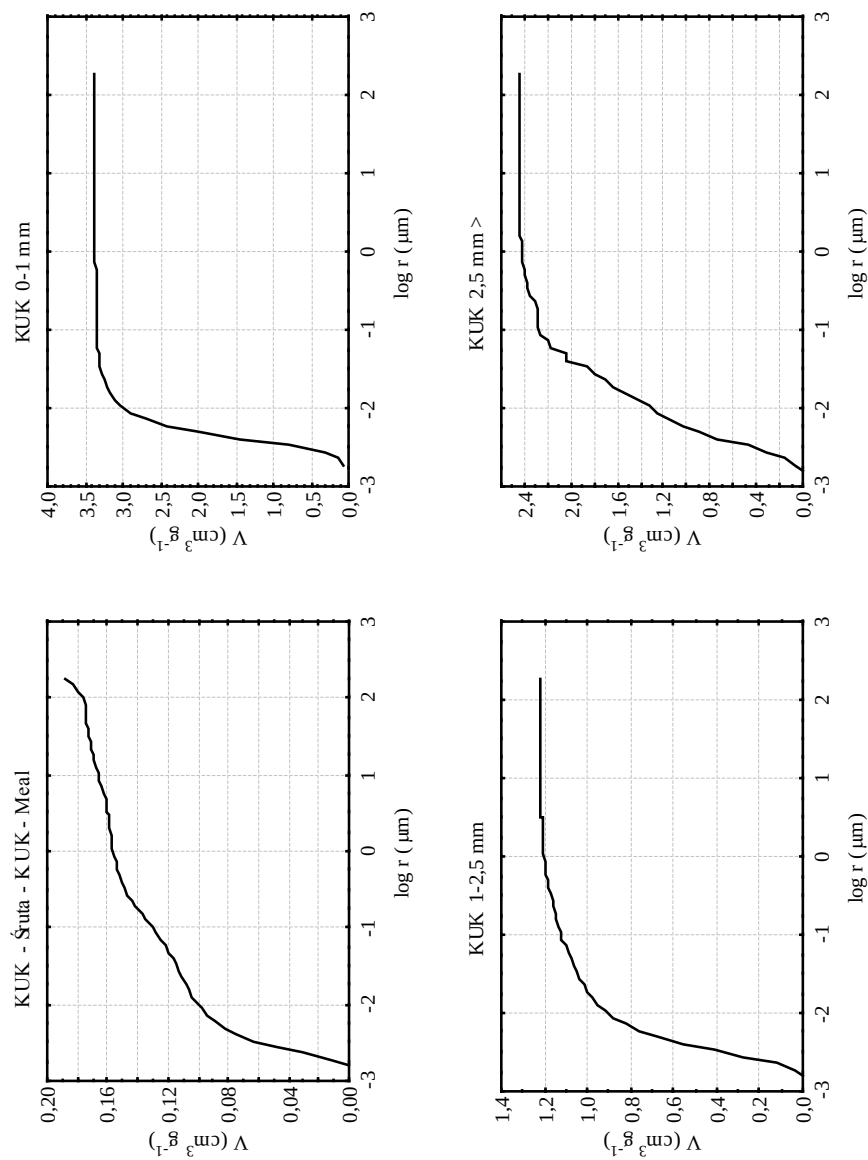
Na rysunkach 8-11 przedstawiono charakterystykę wymiarową porów w materiale badawczym. Średni wymiar porów ekstrudatu pszennego był zróżnicowany i zależał od badanej frakcji. Największe zróżnicowanie w wymiarach promieni porów ekstrudatu pszennego wystąpiło dla frakcji o średnicy cząstek powyżej 2,5 mm oraz dla frakcji od 1 do 2,5 mm. Promień występujących porów dla badanych frakcji mieścił się najczęściej w zakresie od 1 do 100 µm. Charakterystyczny jest rozkład porów dla cząsteczek najdrobniejszych, tj.: o średnicy od 0 do 1 mm, w której przedział najczęściej występujących porów jest bardzo wąski i mieści się w zakresie od 50 do 100 µm. Śruta pszenna nie poddana procesowi obróbki ciśnieniowo-termicznej nie ma właściwości materiału porowatego. Zmierzone pory są szczelinami na powierzchni powstałymi w wyniku rozdrabniania surowca.



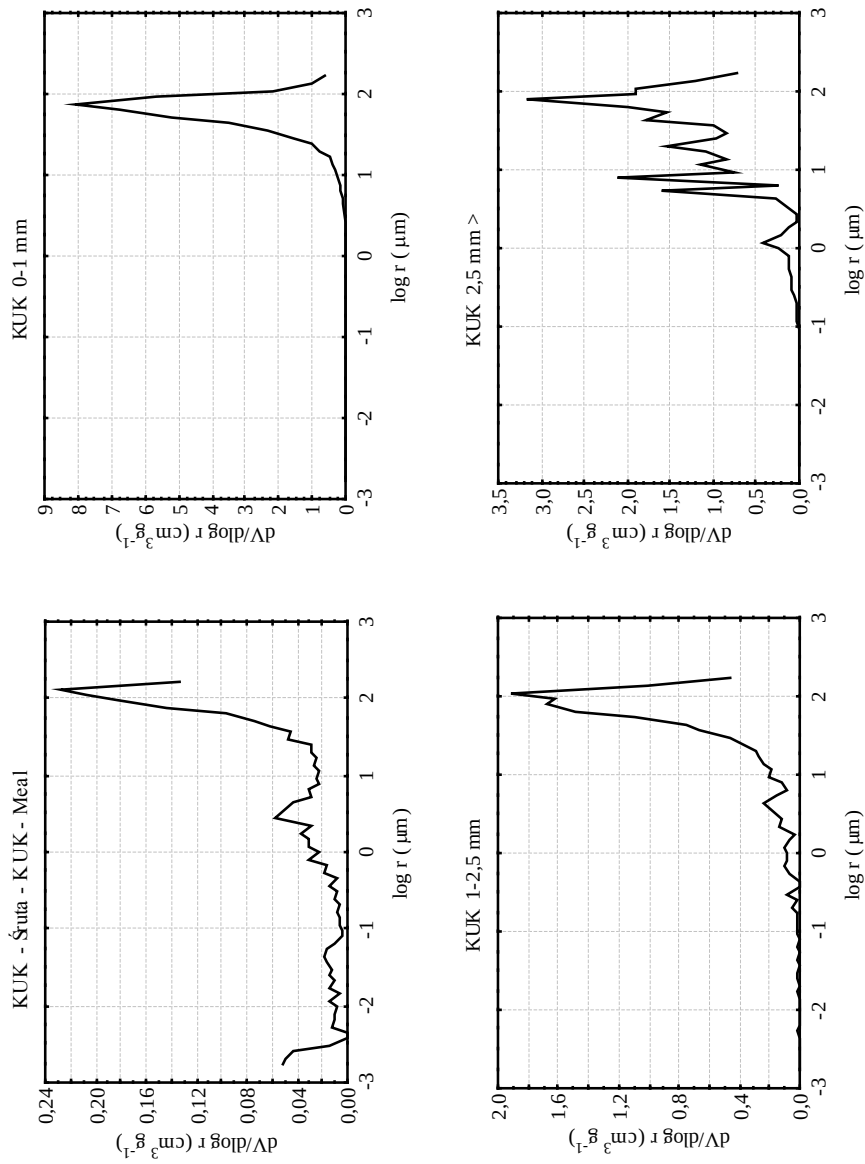
Rys. 8. Sumaryczna objętość porów w zależności od ich promienia dla pszenicy i ekstrudatów pszenicznych
Fig. 8. Cumulative curve of pore volume vs. equivalent pore radius for wheat grain and wheat grain extrudates



Rys. 9. Rozkład objętości porów w zależności od ich promienia dla pszenicy i ekstrudatów pszenicznych
Fig. 9. Differential curve of pore volume vs. equivalent pore radius for wheat grain and wheat grain extrudates



Rys. 10. Sumaryczna objętość porów w zależności od ich promienia dla kukurydzy i ekstrudatów kukurydzianych
Fig. 10. Cumulative curve of pore volume vs. equivalent pore radius for maize and maize extrudates



Rys. 11. Rozkład objętości porów w zależności od ich promienia dla kukurydzy i ekstrudatów kukurydzianych
Fig. 11. Differential curve of pore volume vs. equivalent pore radius for maize and maize extrudates

Jak wynika z analizy porowatości przedstawionej na rysunku 11, materiał nieobrobiony ciśnieniowo-termicznie nie posiadał właściwości materiału porowatego, o czym świadczy objętość wtłoczonej rtęci do szczelin powstałych na cząsteczkach śruty po rozdrabnianiu. Rozkład wymiarów porów dla ekstrudatu kukurydzianego był uzależniony od analizowanej frakcji. Najmniejsze zróżnicowanie w rozmiarach porów zaobserwowano dla frakcji najdrobniejszej od 0 do 1 mm, w której najliczniej występowały pory o promieniu około 80 μm . Również niewielkie zróżnicowanie w wymiarze promienia powstałych porów stwierdzono dla frakcji ekstrudatu od 1 do 2,5 mm. Najliczniej występowały pory o promieniu około 100 μm . Podobne wyniki porowatości ekstrudatów otrzymali w prowadzonych badaniach inni autorzy, tj.: Thymi i in. (2005), Shannon i in. (2010), Barret i Peleg (1992).

5.2.2. Pomiar porowatości za pomocą niskotemperaturowej adsorpcji azotu

Identyfikacja rozmiarów i kształtu powstałych porów w badanym materiale była przeprowadzona za pomocą adsorpcji azotu według wcześniej opisanej metody.

W tabeli 13 przedstawiono wyniki analizy porowatości metodą gazową.

Tabela 13. Wyniki oznaczenia porowatości metodą niskotemperaturowej adsorpcji azotu
Table 13. Results of porosity analysis with low-temperature nitrogen adsorption method

Surowiec Material	S_{BET} ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Średnica porów przy BJH adsorpcji gazu BJH method adsorption pore diameter (4V/A) (nm)	Średnica porów przy BJH desorpcji gazu BJH method desorption pore diameter (4V/A) (nm)	Średnia średnica porów Average pore diameter (4V/A) (nm)
PSZ – śruta PSZ – meal	0,217	5,531	5,267	3,689
PSZ 1-2,5	0,275	17,28	5,659	3,548
KUK śruta KUK – meal	0,326	6,463	6,530	3,246
KUK 1-2,5	1,749	6,195	3,603	3,655

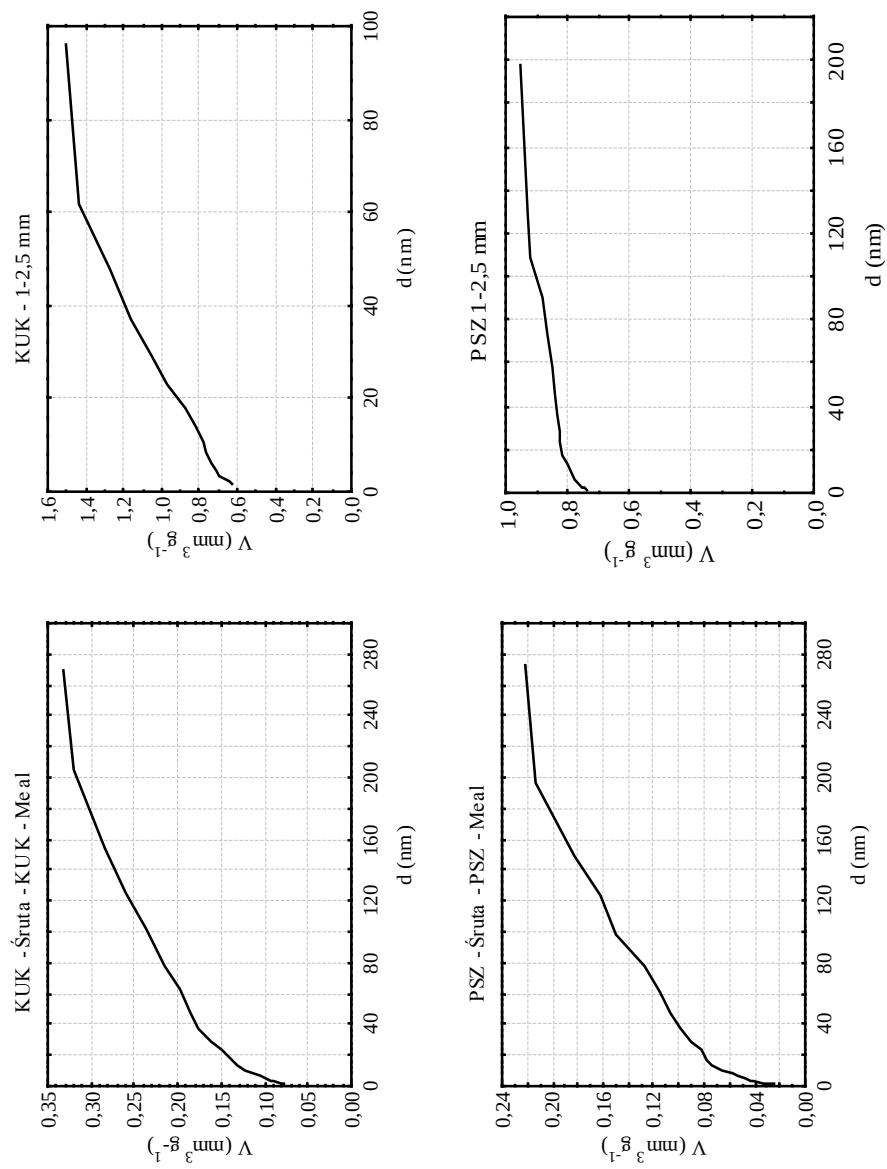
Otrzymane wymiary średnicy dla ekstrudowanej pszenicy oraz kukurydzy świadczą o uzyskaniu porów o kształcie gruszkowatym. Wnioskuje się to na zasadzie różnicy w ich wymiarze przy adsorpcji i desorpcji gazu. I tak, dla ekstrudatu pszenicznego przy adsorpcji gazu otrzymano średnicę 17,28 nm, która jest znacznie większa niż przy desorpcji gazu (5,659 nm), a dla ekstrudatu kukurydzianego 6,195 nm i przy desorpcji 3,603 nm. Natomiast w przypadku śruty pszennej i kukurydzianej średnice porów przy adsorpcji i desorpcji gazu są porównywalne.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono wyniki sumarycznej objętości porów i rozkładu objętości porów. Porównując sumaryczną objętość porów w zakresie średnic od 1 do 100 nm dla śruty kukurydzianej oraz ekstrudatu kukurydzianego można stwierdzić, że wystąpiła znaczna różnica w objętości badanych porów. Maksymalna objętość gazu dla ekstrudatu wzrosła w stosunku do śruty kukurydzianej z $0,23 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ do objętości $1,6 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, co stanowi prawie 7-krotny przyrost objętości.

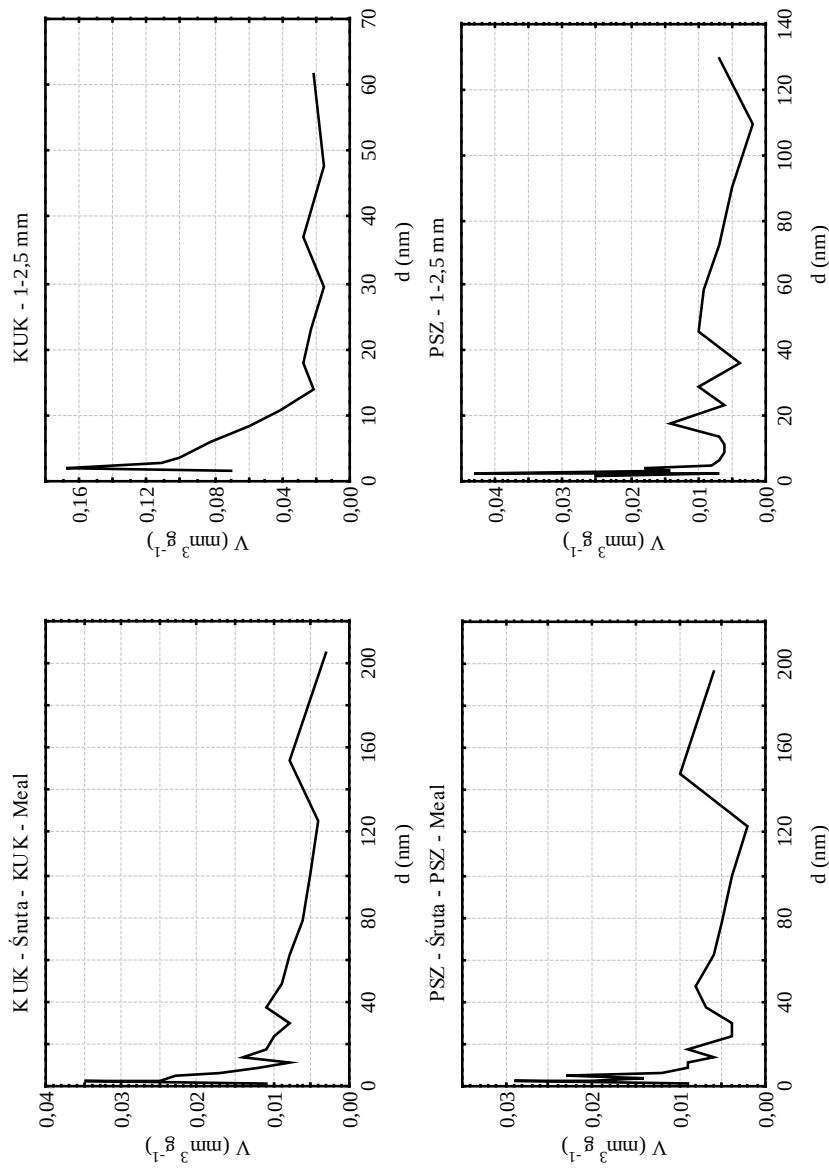
Ekstrudaty pszenne charakteryzują się również większą objętością porów niż śruta pszena. Jednak w porównaniu z ekstrudatem kukurydzianym objętość powstałych porów w badanym zakresie średnic jest mniejsza. Maksymalna objętość gazu dla ekstrudatu pszenicznego wzrosła w stosunku do śruty z $0,15 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ do $0,9 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, co stanowi 6-krotny przyrost objętości.

Analizując rozkład objętości porów względem ich średnic dla pokazanego zakresu, można stwierdzić, że największą objętość uzyskano dla małych średnic, niezależnie od rodzaju badanego materiału. W miarę wzrostu średnicy porów w zakresie od 10 do 60 nm dla ekstrudatu kukurydzianego objętość wtłaczanego gazu zmienia się w przedziale od 0,02 do $0,03 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, natomiast w zakresie do 10 nm objętość wtłoczonego gazu wyniosła maksymalnie $0,17 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Wykres kończy się na średnicy 60 nm, gdyż powyżej tej średnicy objętość wtłaczanego gazu gwałtownie wzrastała, co świadczy o bardzo dużym przyroście porów o przekraczającej ten wymiar średnicy.

Podobne zależności otrzymano analizując rozkład objętości porów względem ich średnic dla śruty pszennej oraz ekstrudatu pszenicznego. Gwałtowny przyrost średnicy porów w ekstrudacie zaobserwowano powyżej wymiaru 130 nm. Natomiast objętość wtłaczanego gazu do porów o średnicy z przedziału od 10 do 130 nm mieściła się w zakresie od 0,005 do $0,015 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Podobną zależność jak w przypadku kukurydzy, uzyskano dla porów o wymiarze do 10 nm, dla których objętość wtłoczonego gazu wyniosła $0,05 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$.



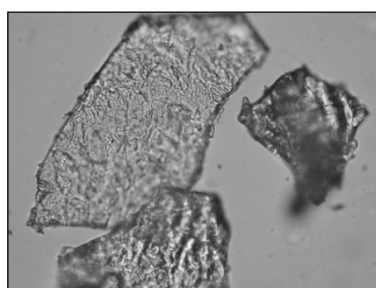
Rys. 12. Sumaryczna objętość porów w zależności od ich średnicy dla badanych materiałów
Fig. 12. Cumulative curve of pore volume vs. equivalent pore diameter for studied material



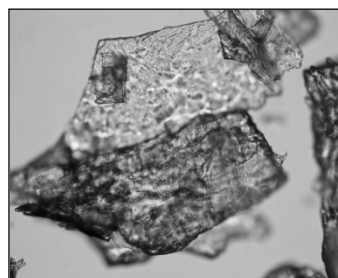
Rys. 13. Rozkład objętości porów względem ich rozmiarów (z izoterm adsorpcji) dla badanych materiałów
Fig. 13. Differential curve of pore volume vs. equivalent pore diameter (from adsorption isotherms) achieved for studied material

5.2.3. Pomiar średnicy porów za pomocą mikroskopu optycznego

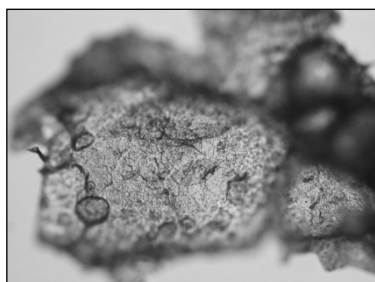
Użycie mikroskopu umożliwiło pomiar średnicy kanalików powietrznych powstałych w materiale podczas obróbki ciśnieniowo-termicznej. W wyniku wysokiej temperatury znajdująca się w materiale skrobia pęczniała, po czym następowało rozrywanie wiązań wodorowych, co w konsekwencji powodowało zwiększenie wodochłonności. Opuszczający matrycę ekstrudera produkt ekspandował w związku z gwałtowną przemianą wody w parę wodną, dzięki czemu przybierał strukturę porowatą (Thymi i in. 2005, Vainionpaa 1991). Na poniższych zdjęciach (Fot. 1) przedstawiono strukturę powstałego ekstrudatu. Następnie przy użyciu programu komputerowego wyznaczono średnicę powstałych porów.



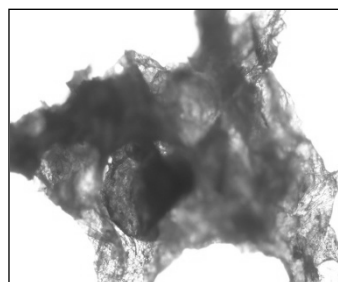
Powiększenie
x500
Magnification
x500



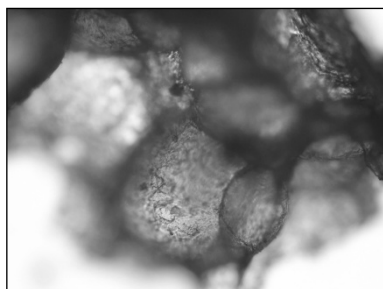
Powiększenie
x200
Magnification
x200



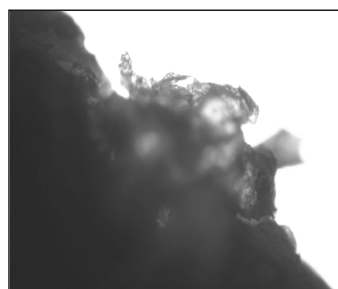
Powiększenie
x100
Magnification
x100



Powiększenie
x100
Magnification
x100



Powiększenie
x100
Magnification
x100



Powiększenie
x40
Magnification
x40

Fot. 1. Obrazy mikroskopowe ekstrudatów w różnym powiększeniu
Photo. 1. Microscope images of extrudates achieved at different magnification

Wyniki oznaczeń średnicy porów przedstawiono w tabelach 14 i 15.

Tabela 14. Średnica porów w ekstrudatach kukurydzianych
Table 14. Diameter of pores in the maize extrudates

Próba Trial	Średnica porów Pore diameter (μm)		
	Frakcja 0-1 mm Fraction 0-1 mm	Frakcja 1-2,5 mm Fraction 1-2.5 mm	Frakcja pow. 2,5 mm Fraction above 2.5 mm
1	2,90	41,98	171,81
2	2,43	96,24	217,19
3	3,19	111,64	329,00
4	2,39	110,30	434,91
5	1,99	37,12	265,78
6	3,19	56,35	240,61
7	2,39	29,95	427,62
8	3,19	32,84	244,97
9	2,15	66,25	222,81
10	2,52	27,53	225,23
11	2,88	34,46	368,23
12	2,33	16,97	400,13
Średnia Average	2,63	55,14	295,69
Odchylenie standardowe Standard deviation	0,423	33,47	91,62
Współczynnik zmienności Coefficient of variation (%)	16,1	60,7	30,9

Tabela 15. Średnica porów w ekstrudatach pszennych
Table 15. Diameter of pores in the wheat grain extrudates

Próba Trial	Średnica porów – Pore diameter (μm)		
	Frakcja 0-1 mm Fraction 0-1 mm	Frakcja 1-2,5 mm Fraction 1-2.5 mm	Frakcja pow. 2,5 mm Fraction above 2.5 mm
1	6,08	69,47	229,55
2	6,23	147,77	233,90
3	6,58	91,52	210,64
4	6,78	64,97	244,48
5	6,31	122,38	99,23
6	6,97	123,48	106,83
7	5,54	86,10	148,79
8	7,87	79,49	143,85
9	9,52	81,96	155,28
10	7,28	68,22	213,01
11	10,01	76,01	198,63
12	7,59	98,30	214,20
Średnia Average	7,23	92,47	183,20
Odchylenie standardowe Standard deviation	1,356	25,95	50,19
Współczynnik zmienności Coefficient of variation (%)	18,7	28	27,4

Otrzymane wyniki jednorodności wariancji Cochra na ekstrudatu kukurydzianego (tab. 16) i pszennego (tab. 17) – $G > G_{\alpha, k, n-1}$, świadczą o odrzuceniu hipotezy zerowej o równych wariancjach i w związku z tym do dalszych analiz zastosowano statystyki nieparametryczne.

Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ test Kruskala-Wallisa wykazał istotne różnice w średnicy powstałych porów dla wszystkich badanych frakcji.

Tabela 16. Wyniki testu jednorodności wariancji Cochrańa dla wymiaru porów ekstrudatu kukurydzianego

Table 16. Results of the variance homogeneity by Cochran test for pore size of corn extrudate

Rodzaj zmiennej Type of variation	Liczba populacji Amount of population k	Liczba powtórzeń Amount of repetitions n	Wartość funkcji testowej Value of testing function G	Wartość krytyczna Critical value $G_{\alpha,k,n-1}$
Wielkość porów Pore size	3	12	0,882	0,602

Tabela 17. Wyniki testu jednorodności wariancji Cochrańa dla wymiaru porów ekstrudatu pszennego

Table 17. Results of the variance homogeneity by Cochran test for pore size of wheat extrudate

Rodzaj zmiennej Type of variation	Liczba populacji Amount of population k	Liczba powtórzeń Amount of repetitions n	Wartość funkcji testowej Value of testing function G	Wartość krytyczna Critical value $G_{\alpha,k,n-1}$
Wielkość porów pore size	3	12	0,788	0,602

Analizując wymiary powstałych porów po obróbce ciśnieniowo-termicznej można stwierdzić, iż zróżnicowanie jest duże, o czym świadczy wyznaczony współczynnik zmienności CV. Jedynie frakcja o średnicy cząsteczek poniżej 1 mm charakteryzowała się małym zróżnicowaniem średnicy porów, czego uzasadnieniem jest średnica cząsteczek. Natomiast w przypadku pozostałych frakcji, np.: w ekstrudacie kukurydzianym o wymiarze cząsteczek od 1 do 2,5 mm średnica porów wynosiła od 16,97 do maksymalnie 111,64 μm .

Wnioski etapowe:

1. W wyniku obróbki ciśnieniowo-termicznej otrzymany produkt posiadał strukturę porowatą o zróżnicowanym kształcie i średnicy porów, które zależały od rodzaju badanego surowca.
2. Inny układ ziaren skrobi oraz ich większa zawartość w kukurydzy niż w pszenicy wpłynęła na zwiększenie objętości porów w badanych zakresach średnic.
3. Średnica powstałych porów mieściła się w szerokim zakresie, tj.: od 2 do ponad 400 μm , jednakże podział na poszczególne frakcje wymiarowe wpływał na mniejsze zróżnicowanie w średnicy porów (szczególnie dla frakcji najdrobniejszej).

4. Sumaryczna objętość porów dla ekstrudatu kukurydzianego, przy średnicy do 100 μm , jest ponad 1,7 raza większa, niż w przypadku sumarycznej objętości porów dla ekstrudatu pszennego.

5.3. Ocena procesu natłuszczenia oraz charakterystyka koncentratu tłuszczowego

Proces natłuszczenia prowadzony był w mieszarce w ciśnieniu atmosferycznym oraz w warunkach podciśnienia. Ocenę jednorodności rozproszczenia tłuszczu w surowcach dokonaną metodą mikrowskaźników przedstawiono w tabelach 18 i 19.

Tabela 18. Ocena stopnia wymieszania ekstrudatu pszennego

Table 18. Mixing degree of wheat grain extrudates

Parametr Parameter	Przy ciśnieniu atmosferycznym At atmospheric pressure	Przy podciśnieniu (500 hPa) At negative pressure (500 hPa)
	Frakcja 0-1 mm – Fraction 0-1 mm	
Średnia – Average	116,3	123,9
Odchylenie standardowe Standard deviation	11,28	11,15
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	9,703	9,007
	Frakcja 1-2,5 mm – Fraction 1-2.5 mm	
Średnia – Average	113,5	113,7
Odchylenie standardowe Standard deviation	10,86	10,16
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	9,572	8,940
	Frakcja powyżej 2,5 mm – Fraction above 2.5 mm	
Średnia – Average	91,9	107,4
Odchylenie standardowe Standard deviation	10,21	8,071
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	11,11	7,515

Tabela 19. Ocena stopnia wymieszania ekstrudatu kukurydzianego
Table 19. Mixing degree of maize extrudates

Parametr Parameter	Przy ciśnieniu atmosferycznym At atmospheric pressure	Przy podciśnieniu (500 hPa) At negative pressure (500 hPa)
	Frakcja 0-1 mm – Fraction 0-1 mm	
Średnia – Average	107,7	96,4
Odchylenie standardowe Standard deviation	9,141	12,42
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	8,487	12,89
	Frakcja 1-2,5 mm – Fraction 1-2.5 mm	
Średnia – Average	99,1	90,3
Odchylenie standardowe Standard deviation	9,70	9,65
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	9,788	10,68
	Frakcja powyżej 2,5 mm – Fraction above 2.5 mm	
Średnia – Average	92,8	95,3
Odchylenie standardowe Standard deviation	12,65	12,38
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	13,63	12,99

Otrzymane współczynniki zmienności na poziomie 8 lub 9% świadczą o równomiernym rozproszczeniu tłuszczu w mieszance. Mieszanie w warunkach podciśnienia nie wpłynęło istotnie na równomierność wymieszania. Otrzymane wyniki na poziomie poniżej 15% można uznać za dostateczne.

Istotnym problemem było dobranie odpowiedniej ilości dozowanego tłuszczu do mieszkarki. W przypadku zbyt dużej ilości tłuszczu lub zbyt intensywnym dozowaniu wystąpiło oblepienie wału mieszkarki oraz łopatek mieszających, w wy-

niku czego nie następowało prawidłowe wchłanianie tłuszczu i wymieszanie. Przykłady zaobserwowanych różnic przedstawiono na fotografii 2.

a)



b)



Fot. 2. Wnętrze mieszarki podczas natłuszczania: a) przy zbyt intensywnym lub za dużym dodatku tłuszczu, b) przy prawidłowym przebiegu procesu natłuszczania

Photo. 2. Interior of the mixer during greasing: a) at too intensive or too high fat addition, b) proper greasing process

W tabeli 20 przedstawiono właściwości fizyczne nieobrabianego ciśnieniowo-termicznie surowca z identycznym dodatkiem tłuszczu płynnego jak w przypadku ekstrudatów.

Tabela 20. Właściwości fizyczne produktu natłuszczonego bez procesu ekstruzji
Table 20. Physical properties of greased material without extrusion cooking process

Surowiec Material	Frakcja Fraction (mm)	Gęstość usypowa Bulk density (kg·m ⁻³)	Gęstość utrzęsiona Shaken density (kg·m ⁻³)	Kąt zsypania Chute angle (°)	Kąt usypu Angle of repose (°)
Natłuszczona śruta kukurydziana Greased corn meal	0-1	655,3	712,4	76	43,6
	1-2,5	725,2	779,4	57	52,6
	pow. 2,5 above 2.5	755,3	885,6	53	49,8
Natłuszczona śruta pszenna Greased wheat meal	0-1	612,2	674,6	75	45
	1-2,5	761,0	824,5	54	50,5
	pow. 2,5 above 2.5	863,0	902,4	57	47,3

Dodatek tłuszczu płynnego do śruty pszennej lub kukurydzianej powodował wzrost gęstości oraz kąta usypu i zsypania surowca. Otrzymany produkt charakteryzował się niską sypkością, a dodany tłuszcz nie został wchłonięty do wnętrza produktu.

Ekstrudaty pszenne i kukurydziane mają strukturę koloidalno-kapilarnoporowatą, co ułatwiało absorpcję dozowanego tłuszczu. W tabeli 21 przedstawiono właściwości fizyczne ekstrudatu po procesie natłuszczania.

Otrzymany koncentrat tłuszczowy na bazie ekstrudatu pszennego lub kukurydzianego charakteryzował się niższą gęstością w stosunku do śruty natłuszczonej nieobrabianej ciśnieniowo-termicznie. Otrzymany produkt charakteryzował się niższym kątem zsypania w porównaniu do natłuszczonej śruty, w związku z czym było łatwiejsze jego dozowanie oraz magazynowanie.

Ocenę sypkości uzyskanego koncentratu dokonano na podstawie analizy zmiany kąta usypu i zsypania surowca, wyliczając procentowe przyrosty tych wartości po procesie natłuszczania dla surowca obrabianego i nieobrabianego ciśnieniowo-termicznie. Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono procentowe zmiany kąta usypu i zsypania dla badanych produktów.

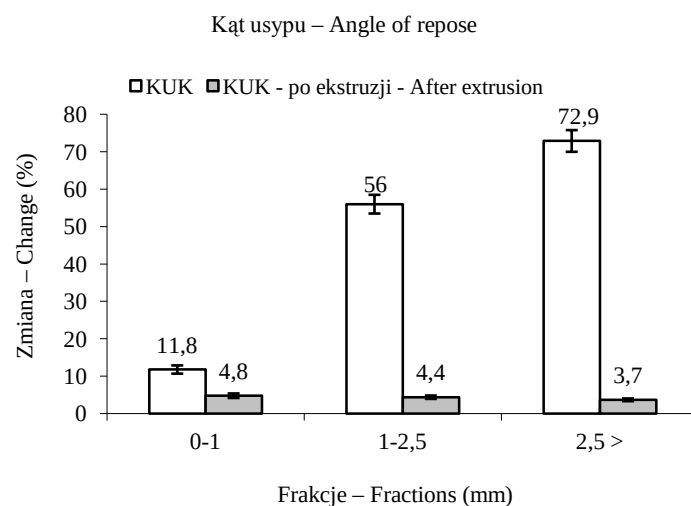
Tabela 21. Właściwości fizyczne koncentratu tłuszczowego
Table 21. Physical properties of the fat concentrate

Surowiec Material	Frakcja Fraction (mm)	Wilgot- ność Moisture content (%)	Gęstość usypowa Bulk density (kg·m ⁻³)	Gęstość utrząsiona Shaken density (kg·m ⁻³)	Kąt zsypu Chute angle (°)	Kąt usypu Angle of repose (°)
Natłuszczony ekstrudat kuku- rydziany Greased corn extrudates	0-1		230,9	265,5	80	47,2
	1-2,5	6,9	102,3	123,5	60	42
	pow. 2,5 above 2.5		76,5	103,7	44	36,3
Natłuszczony ekstrudat pszenny Greased wheat extrudates	0-1		372,5	403,4	64	48
	1-2,5	8,1	263,2	295,6	61	45,4
	pow. 2,5 above 2.5		247,3	280,7	48	44,4

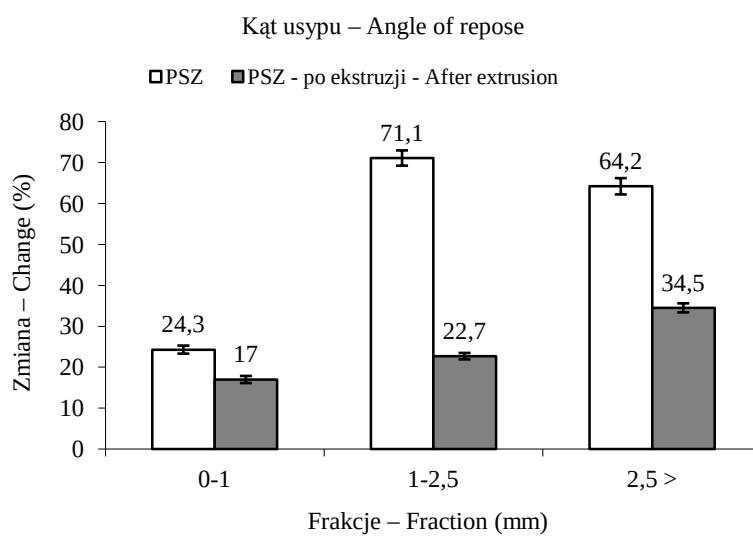
Kąt usypu dla kukurydzy nie poddanej obróbce ciśnieniowo-termicznej po natłuszczeniu wzrósł powyżej 70% dla frakcji najgrubszej. Natomiast koncentrat otrzymany na bazie ekstrudatu kukurydzianego po obróbce ciśnieniowo-termicznej charakteryzował się niewielką zmianą kąta usypu, która wynosiła 4,8% dla frakcji najdrobniejszej i 3,7% dla frakcji najgrubszej. Przyrost procentowy kąta usypu dla koncentratu pszennego, podobnie jak dla kukurydzy, charakteryzował się zbliżoną zależnością. Większe zmiany zaobserwowano dla ekstrudatu pszennego niż dla kukurydzianego. Spowodowane to jest mniejszym stopniem ekspandowania pszenicy w stosunku do kukurydzy.

Podobne zależności uzyskano przy analizie kąta zsypu. Natłuszczony ekstrudat charakteryzował się mniejszym przyrostem kąta zsypu niż surowiec nie poddany obróbce ciśnieniowo-termicznej.

a)



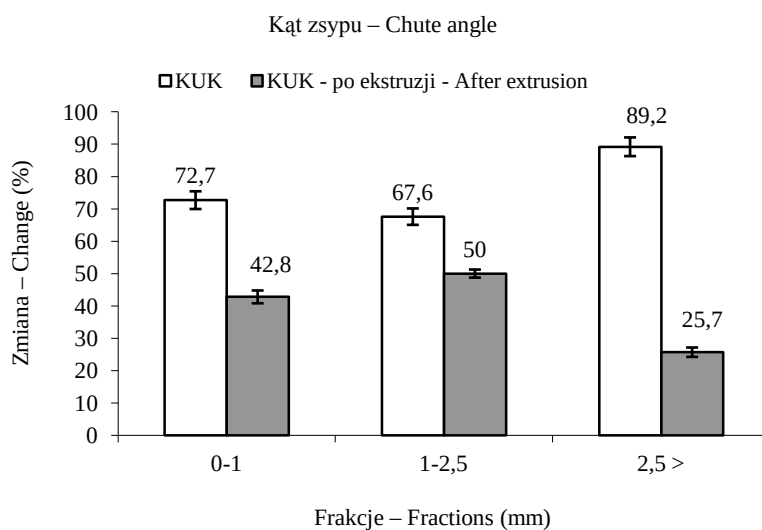
b)



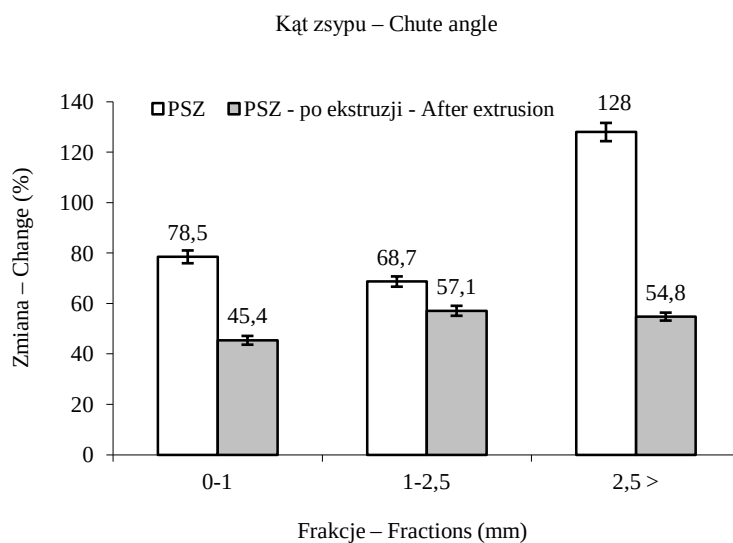
Rys. 14. Porównanie zmian procentowych kąta usypu w surowcu poddanym procesowi ekstruzji i surowcu bez procesu ekstruzji: a) kukurydza, b) pszenica

Fig. 14. Comparison of percentage changes of the angle of repose in the raw material subjected to the process of extrusion cooking and without extrusion cooking process for: a) maize, b) wheat

a)



b)



Rys. 15. Porównanie zmian procentowych kąta zsyphu w surowcu poddanym procesowi ekstruzji i surowcu bez procesu ekstruzji: a) kukurydza, b) pszenica

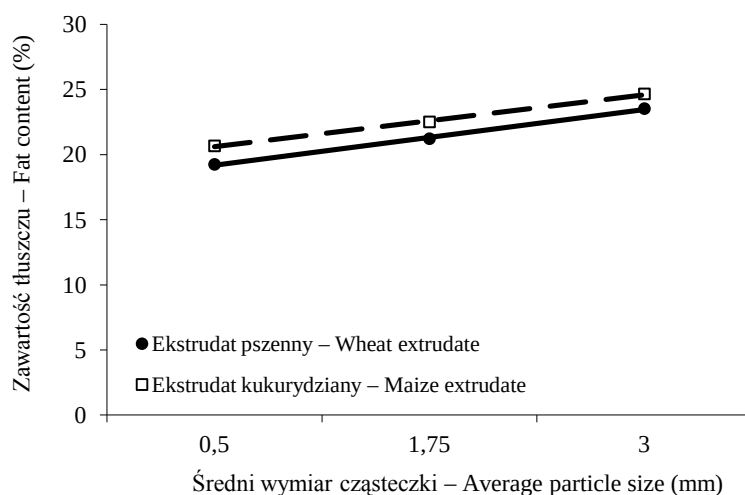
Fig. 15. Comparison of percentage changes of the chute angle in the raw material subjected to the process of extrusion cooking and without extrusion cooking process for: a) maize, b) wheat

Po przeprowadzeniu dokładnej analizy chemicznej dokonano oceny ilości tłuszczu znajdującego się w poszczególnych frakcjach ekstrudatów. Wyniki zawartości przedstawiono w tabeli 22.

Tabela 22. Zawartość tłuszczu wg metody Soxhleta w koncentracie po natłuszczeniu w warunkach ciśnienia atmosferycznego i podciśnienia

Table 22. Fat content according to the Soxhlet method in the concentrate after greasing at atmospheric pressure and at negative pressure

Frakcja Fraction (mm)	Zawartość tłuszczu – Fat content (%)			
	Ekstrudat pszenney Wheat extrudates		Ekstrudat kukurydziany Corn extrudates	
	Ciśnienie atmosferyczne Atmospheric pressure	Podciśnienie Negative pressure	Ciśnienie atmosferyczne Atmospheric pressure	Podciśnienie Negative pressure
0-1	19,24	22,35	20,66	22,52
1-2,5	21,21	22,98	22,50	23,87
Ponad 2,5 Above 2.5	23,52	24,07	24,65	25,09



Rys. 16. Zawartość tłuszczu w zależności od wymiaru ekstrudatu

Fig. 16. Fat content vs. size of extrudates

Najwięcej tłuszczu zostało zaabsorbowane przez frakcję najgrubszą, w strukturze której powstały największe pory. Zawartość tłuszczu w ekstrudowanej kukurydzy jest wyższa niż w ekstrudowanej pszenicy (rys. 16).

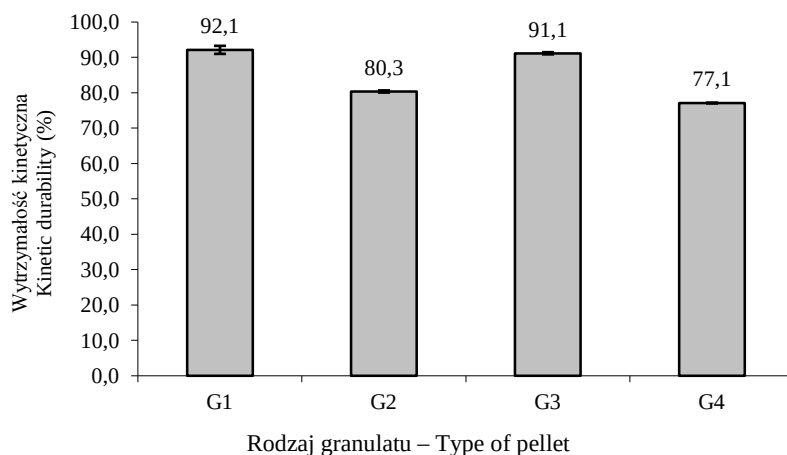
Wnioski etapowe:

1. Oceniając stopień wymieszania za pomocą mikrowskaźników można stwierdzić, że dobrane czasy mieszania były prawidłowe, a rozprowadzenie tłuszczu w ekstrudacie było równomierne.
2. Po dodaniu tłuszczu płynnego do nieprzetworzonej śruty pszennej i kukurydzianej nastąpił wzrost kąta zsypu i usypu nawet o 128% dla frakcji o średnicy cząsteczek powyżej 2,5 mm w pszenicy.
3. Rzeczywista zawartość tłuszczu w ekstrudatach zależy od stopnia rozdrobnienia ekstrudatów. Frakcje o średnicy cząstek powyżej 1 mm wchłaniają więcej tłuszczu niż frakcje o średnicy cząstek poniżej 1 mm. Natłuszczenie ekstrudatów w warunkach podciśnienia spowodowało wzrost ilości wchłoniętego tłuszczu o około 2% niż podczas natłuszczania pod ciśnieniem atmosferycznym.

5.4. Ocena procesu granulowania oraz charakterystyka granulatu z dodatkiem wytworzonego koncentratu tłuszczowego

Podstawowym parametrem jakościowym granulatów jest ich wytrzymałość kinetyczna. Przyjmuje się, że wytrzymałość kinetyczna wyznaczona metodą Pfo- sta powinna wynosić powyżej 90%. Na rysunku 17 przedstawiono wytrzymałość kinetyczną granulatów uzyskanych z opracowanym dodatkiem tłuszczowym, tłuszczem płynnym oraz bez dodatku tłuszczu, jako próba kontrolna.

W badaniach składu chemicznego na zawartość tłuszczu, które przedstawiono na rysunku 18, ilość tłuszczu z surowców tworzących mieszankę wynosiła 2,16%. Wytrzymałość kinetyczna takiego granulatu wynosiła ponad 92%. Dodatek tłuszczu płynnego do mieszanki, który po analizie chemicznej wyznaczono na poziomie 6,6%, spowodował obniżenie wytrzymałości kinetycznej do nieco ponad 80%. Granulat uzyskany z dodatkiem tłuszczowym na bazie kukurydzy charakteryzował się wytrzymałością kinetyczną porównywalną z wytrzymałością próby kontrolnej i wynosił ponad 91%, przy zawartości tłuszczu w granulacie 6,33%. Natomiast granulat uzyskany z mieszanki z dodatkiem tłuszczowym na bazie ekstrudowanej pszenicy charakteryzował się wytrzymałością kinetyczną niższą, wynoszącą 77%, przy całkowitej zawartości tłuszczu w granulacie około 7%.



Rys. 17. Wytrzymałość kinetyczna granulatu wyznaczona metodą Pfosta

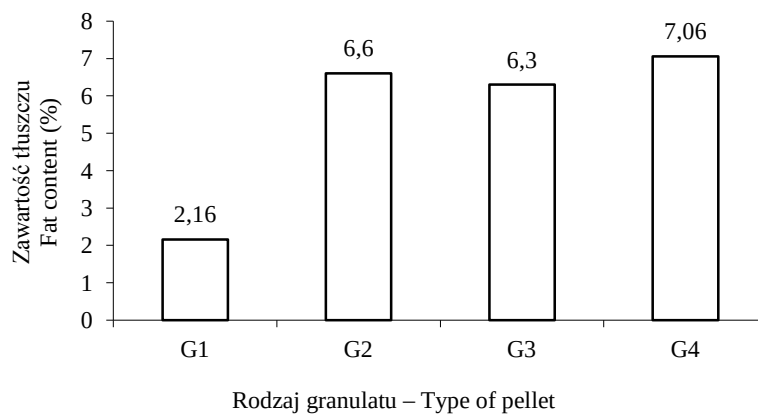
Fig. 17. Pellet durability achieved with the Pfost metod

G1 – Próba kontrolna – Control trial

G2 – Granulat z dodatkiem tłuszczu płynnego – Pellet with liquid fat addition

G3 – Granulat z dodatkiem tłuszczowego koncentratu kukurydzianego – Pellet with concentrated fat corn addition

G4 – Granulat z dodatkiem tłuszczowego koncentratu pszennego – Pellet with concentrated fat wheat addition



Rys. 18. Zawartość tłuszczu w granulacie

Fig. 18. Fat content in the pellets

G1 – Próba kontrolna – Control trial

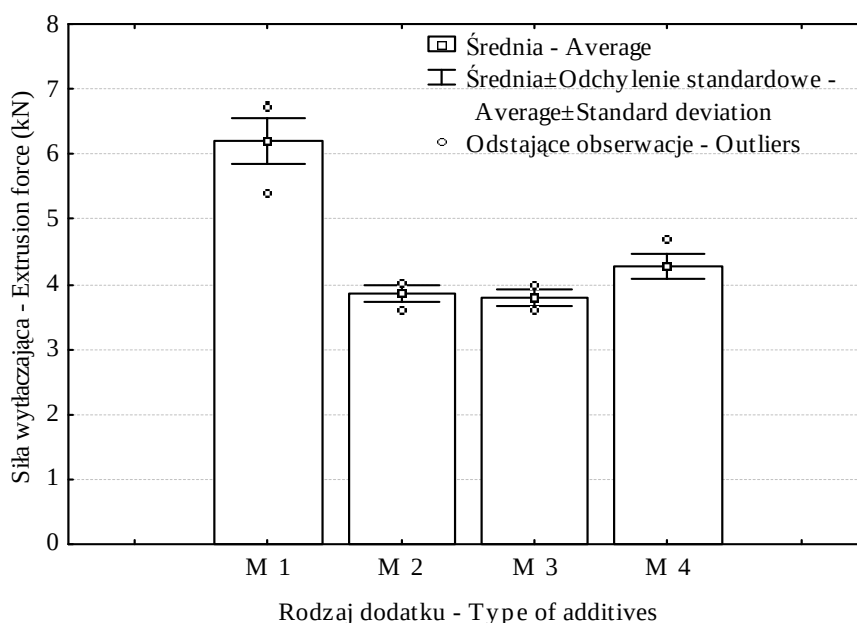
G2 – Granulat z dodatkiem tłuszczu płynnego – Pellet with liquid fat addition

G3 – Granulat z dodatkiem tłuszczowego koncentratu kukurydzianego – Pellet with concentrated fat corn addition

G4 – Granulat z dodatkiem tłuszczowego koncentratu pszennego – Pellet with concentrated fat wheat addition

Charakterystycznym parametrem pomiarowym podczas procesu granulowania jest wartość siły wytłaczającej badaną mieszanek przez otwór matrycy. Takie pomiary odzwierciedlają wartości jednostkowych nacisków zagęszczających. Badania naukowe dowiodły, iż wraz ze zwiększeniem długości otworów w matrycy pierścieniowej wzrastają wartości jednostkowych nacisków zagęszczających. Dodatkowo długość otworu w matrycy i jej prędkość obrotowa mają decydujący wpływ na stan obciążenia układu roboczego oraz na energochłonność procesu (Obidziński i Hejft 2007, Hejft 2002, Laskowski i Skonecki 2001, 2004).

W trakcie badań dokonano pomiaru siły wytłaczającej mieszanek przez otwór odzwierciedlający przejście mieszanki przez matrycę granulatora.



Rys. 19. Wykresy pudełkowe dla wartości siły wytłaczającej w zależności od wprowadzonego dodatku

Fig. 19. Value of extrusion force depending on the additives applied

Oznaczenia do wykresu:

M 1 – próba kontrolna – control sample

M 2 – mieszanka z dodatkiem tłuszczu płynnego – mixture with liquid fat addition

M 3 – mieszanka z dodatkiem koncentratu tłuszczowego na bazie pszenicy – mixture with addition of fat concentrate based on wheat

M 4 – mieszanka z dodatkiem koncentratu tłuszczowego na bazie kukurydzy – mixture with addition of fat concentrate based on maize

Tabela 23. Analiza wariancji siły wytłaczającej w zależności od zastosowanego dodatku do mieszanki

Table 23. Analysis of variance in the extrusion force depending on the additives in the mixture

Źródło zmienności Source of changes	Stopnie swobody Degree of freedom	Sumy kwadratów Sum of squares	Średnie kwadraty Mean squares	Wartość funkcji testującej F Value of the test function F	F_{α}	p
Rodzaj dodatku Type of additive	3	38,22	12,74	219,55	2,87	p<0,05
Błąd Error	36	2,089	0,058			

Tabela 24. Podstawowe statystyki opisowe wraz z grupami jednorodnymi dla siły wytłaczającej

Table 24. Basic descriptive statistics with homogeneous groups for the extrusion force

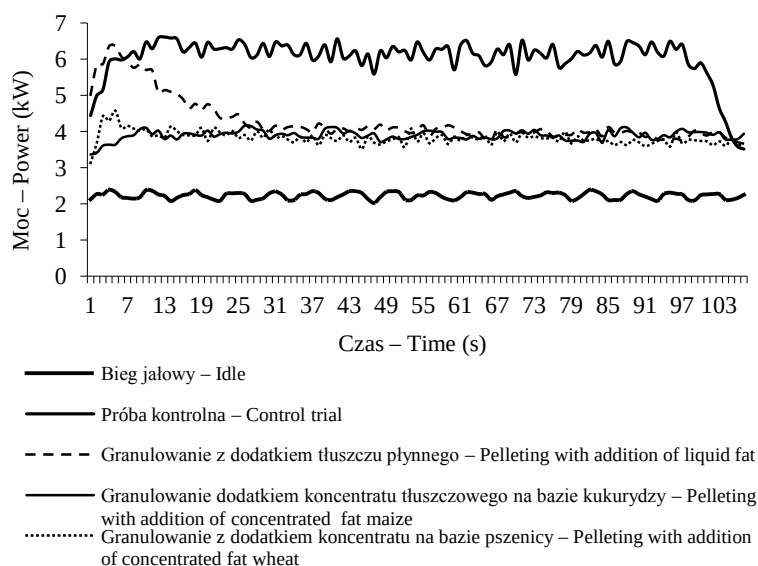
Rodzaj dodatku Type of additive	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error
Tłuszcz płynny Liquid fat	3,854 ^a	0,127	0,040
Koncentrat tłuszczowy na bazie pszenicy Fat concentrate based on wheat	3,789 ^a	0,142	0,047
Koncentrat tłuszczowy na bazie kukurydzy Fat concentrate based on corn	4,269 ^b	0,213	0,064
Próba kontrolna Control sample	6,202 ^c	0,383	0,121

*Ta sama litera przy średniej oznacza brak istotnej różnicy przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$,

* The same letter at mean denotes no significant difference at significance level $\alpha = 0.05$.

Siła wyłaczająca mieszankę (próbkę kontrolną) przez przykładowy otwór w matrycy wynosiła w granicach 6,2 kN. Przeprowadzona analiza wariancji potwierdziła wystąpienie różnic w wartości tej siły dla pozostałych mieszanek (tab. 23). Dodatek tłuszczu płynnego spowodował obniżenie siły wyłaczającej do wartości 3,8 kN (rys. 19). Nie zaobserwowano natomiast statystycznie istotnych różnic w wartości siły wyłaczającej w przypadku zastosowania tłuszczu płynnego i koncentratu tłuszczowego do mieszanki na bazie pszenicy (tab. 24). Natomiast wprowadzenie koncentratu tłuszczowego do mieszanki na bazie kukurydzy, po którym ogólna zawartość tłuszczu w granulacie wynosiła 6,33%, spowodowało wzrost siły wyłaczającej do wartości 4,2 kN w stosunku do mieszanki z dodatkiem tłuszczu płynnego.

Pomiary obciążenia silnika granulatora podczas granulowania poszczególnych mieszanek wykonano na linii granulacyjnej według założonej metodyki. Rejestrację prowadzono od początku trwania procesu przez kolejne 100 sekund. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 20. Ustabilizowanie procesu granulowania następowało po 15-20 sekundach od rozruchu. Wraz z upływem czasu rozruchu malało obciążenie układu roboczego. Podobne rezultaty można zaobserwować w innych publikacjach (MacMahon i Payne 1991, Obidziński 2006, Hejft i Obidziński 2012, Wood 1987, Obidziński i Hejft 2006, 2007, 2011, Laskowski 1989).



Rys. 20. Pobór mocy podczas procesu granulowania

Fig. 20. Power consumption during the granulation process

Zgodnie z oczekiwaniami największy pobór mocy nastąpił podczas granulowania mieszanki bez dodatku tłuszczu. Dodatek tłuszczu płynnego lub w postaci koncentratu do mieszanki na bazie pszenicy lub kukurydzy spowodował obniżenie poboru mocy do poziomu około 4 kW.

Przeprowadzone testy istotności potwierdzają wystąpienie różnic w poborze mocy pomiędzy rodzajem wprowadzonych dodatków (tab. 25 i 26).

Tabela 25. Analiza wariancji poboru mocy w zależności od zastosowanego dodatku do mieszanki na poziomie istotności $\alpha = 0,05$

Table 25. Analysis of variance in power consumption depending on the additives in the mixture, at the level of significance $\alpha = 0.05$

Źródło zmienności Source of changes	Stopnie swobody Degree of freedom	Sumy kwadratów Sum of squares	Średnie kwadraty Mean squares	Wartość funkcji testującej F Value of the test function F	F_{α}	p
Rodzaj dodatku Type of additive	4	989,86	247,46	10829,4	2,38	p<0,05
Błąd Error	719	16,43	0,022			

Tabela 26. Podstawowe statystyki opisowe wraz z grupami jednorodnymi dla poboru mocy przez granulator

Table 26. Basic descriptive statistics with homogeneous groups for power consumption

Rodzaj dodatku Type of additive	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error
Tłuszcz płynny Liquid fat	3,928 ^a	0,153	0,014
Koncentrat tłuszczowy na bazie kukurydzy Fat concentrate based on maize	3,891 ^{ab}	0,126	0,008
Koncentrat tłuszczowy na bazie pszenicy Fat concentrate based on wheat	3,835 ^b	0,174	0,016
Próba kontrolna Control sample	6,194 ^c	0,238	0,024
Bieg jałowy Idle	2,210 ^d	0,088	0,006

*Ta sama litera przy średniej oznacza brak istotnej różnicy przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$,

* The same letter at mean denotes no significant difference at significance level $\alpha = 0.05$.

Wnioski etapowe:

1. Największa siła wytłaczająca wystąpiła dla próby kontrolnej, czyli bez dodatku tłuszczu. Dodatek tłuszczu płynnego spowodował obniżenie siły wytłaczającej. Natomiast wprowadzenie koncentratu tłuszczowego do mieszanki na bazie pszenicy nie spowodowało statystycznie istotnych zmian w wartości siły wytłaczającej w stosunku do mieszanki z tłuszczem płynnym.
2. Wytrzymałość kinetyczna zależy od ilości wprowadzonego tłuszczu do granulatu. Granulat z zawartością tłuszczu powyżej 7% charakteryzował się najmniejszą wytrzymałością, wynoszącą 77%.
3. Wytrzymałość kinetyczna wzrosła po wprowadzeniu tłuszczu z koncentratu sypkiego na bazie kukurydzy w stosunku do granulatu z dodatkiem tłuszczu płynnego.

6. DYSKUSJA

Zasadność wyboru materiału badawczego, a następnie podjęcie badań mających na celu określenie wpływu obróbki ciśnieniowo-termicznej na efektywność wytwarzania koncentratów tłuszczowych, potwierdza szereg prac (Berbec i in. 1980, Kłoczek 1997, Matyka 1997, Mościcki i in. 2007). Przeprowadzony proces ekstruzji był zróżnicowany parametrycznie w zależności od surowca. Zaobserwowano, że jest to w znacznym stopniu związane z wymiarem ziaren skrobi. Podobne stanowisko reprezentują inni autorzy badający proces ekstruzji surowców pochodzenia roślinnego (Chinnaswamy i Hanna 1988, Gomez i Aguilera 1983, 1984, Mościcki i in. 2007).

Po procesie ekstrudowania, przy założonych parametrach obróbki, uzyskano materiał o wysokim stopniu ekspandowania, a w szczególności podczas ekstrudowania kukurydzy. Natomiast aby uzyskać podobny stopień ekspandowania dla pszenicy, należało zastosować większe ciśnienie w ekstruderze dwuślimakowym ekstrudując w temperaturze 160°C i prędkości obrotowej ślimaka 100 obr·min⁻¹. Inni autorzy badając proces ekstrudowania, stosowali parametry w zakresie od 100 do 260°C i prędkość obrotową ślimaka 100-200 obr·min⁻¹, uzyskując wysoką porowatość w zakresie temperatur od około 160 do 200°C, co uzależnione było od wilgotności wejściowej surowca (Fletcher i in. 1985, Kirby i in. 1988, Padmanabhan i Bhattachayya 1989, Mościcki 2003, 2007, Miller 1988).

W kolejnym etapie badań otrzymane ekstrudaty poddawano rozdrobnieniu na mniejsze frakcje (poniżej 1 mm, 1-2,5 mm oraz powyżej 2,5 mm). Najbardziej równomierny podział ilości frakcji, w badanym zakresie szczelin uzyskano stosu-

jąc szczelinę o szerokości 2 mm, którą następnie przyjęto do rozdrabniania całego surowca. Ponadto rozdrabniano ekstrudaty z zastosowaniem sita o średnicy otworów 2 i 4 mm w rozdrabniaczu bijakowym. Przy użyciu sita o średnicy otworów 2 mm uzyskano duży udział frakcji drobnej. Zaobserwowano w tym przypadku silne zróżnicowanie w rozkładzie granulometrycznym, spowodowane kruchością ekstrudatu. Stosując sito o średnicy otworów 4 mm, stwierdzono, że udział frakcji najdrobniejszej (poniżej 1 mm) zmniejszył się o 50% w porównaniu z rozdrabnianiem za pomocą sita o średnicy otworów 2 mm. Uzyskano największy udział frakcji dla cząsteczek powyżej 2,5 mm. Podobne zależności na przykładzie rozdrabniania ziarna różnych odmian pszenicy osiągnęli inni autorzy (Anderson 1994, Dziki i Laskowski 2010).

Istotnym elementem badań było wyznaczenie fizycznych właściwości surowców, w związku z czym należało sporządzić charakterystykę surowca, która miała wpływ m.in. na dalsze przetwarzanie i dobór urządzeń do obróbki. W licznych badaniach naukowych wartości liczbowe poszczególnych właściwości fizycznych bardzo często są rozbieżne i nieporównywalne. Jest to ściśle związane z biologicznym pochodzeniem surowców i wynikającą z tego ich zmiennością, co można znaleźć również w publikacjach innych autorów (Ekielski i in. 2006, Thomas i in. 1997). Wytworzone ekstrudaty różniły się właściwościami fizycznymi od właściwości surowców przed ekstruzją. Obróbka ciśnieniowo-termiczna wpłynęła na gęstość materiału, zmniejszając ją dla niektórych surowców nawet 10-krotnie. Istotny jest również wzrost wartości kąta zsypania i usypu po procesie ekstruzji. W związku z powyższym należy sądzić o zmianie struktury materiału. Ponadto w wyniku procesu ekstruzji nastąpił wzrost tarcia międzycząsteczkowego oraz tarcia zewnętrznego. Takie badania na kukurydzy o zróżnicowanej wilgotności prowadzili m.in. Ghorpade i in. (1997), Gomez i in. (1983) w efekcie uzyskując ścisłą zależność właściwości fizycznych ekstrudatu od charakterystyki wejściowej surowca.

Do wyznaczenia średnicy porów w materiale badawczym zastosowano aparat rejestrujący objętość rtęci wnikałej do porów badanego materiału. W związku z powyższym możliwe było przedstawienie krzywej zależności objętości porów otwartych od stosowanego ciśnienia i rozkładu objętości porów w zależności od ich promienia. Średnica porów ekstrudatu pszennego była zróżnicowana i zależała od badanej frakcji. Największe zróżnicowanie wymiarowe zaobserwowano we frakcji o wymiarze cząsteczek powyżej 2,5 mm oraz we frakcji o wymiarze cząsteczek od 1 do 2,5 mm zarówno dla ekstrudatu pszennego jak i kukurydzianego. Analiza porowatości dowiodła, że materiał nieobrobiony ciśnieniowo-termicznie nie posiadał właściwości materiału porowatego. Świadczyła o tym objętość wtłoczzonej rtęci do szczelin powstałych na cząsteczkach śruty po rozdrabnianiu. Ba-

dania porowatości ekstrudatów roślinnych prowadzili m.in. Thymi i in. (2005), Shannon i in. (2010), Zogzas i in. (1994), Padmanabhan i Bhattachayrya (1989), porównując je w zależności od parametrów procesu ekstruzji.

Dla ekstrudowanej pszenicy i kukurydzy wyznaczono średnie średnice mezoporów metodą BJH, które świadczą o gruszkowatym kształcie porów. Wynika to z różnicy w wymiarze średnicy mezoporów, przy adsorpcji i desorpcji gazu. Natomiast w przypadku śruty pszennej i kukurydzianej średnie średnice mezoporów są porównywalne. Sumaryczna objętość porów w zakresie średnic od 1 do 100 nm dla śruty kukurydzianej oraz ekstrudatu kukurydzianego świadczy o znacznej różnicy w objętości badanych porów. Maksymalna objętość gazu dla ekstrudatu wzrosła w stosunku do śruty kukurydzianej z $0,23 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ do objętości $1,6 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, co świadczy o prawie 7-krotnym przyroście objętości. Również większą objętością porów niż śruta pszenna charakteryzowały się ekstrudaty pszenne. Jednakże porównując je z ekstrudatem kukurydzianym, objętość powstałych porów w badanym zakresie średnic jest mniejsza. Maksymalna objętość gazu dla ekstrudatu pszennego wzrosła w stosunku do śruty z $0,15 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ do $0,9 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, co świadczy o 6-krotnym przyroście objętości. W dostępnej literaturze nie badano tego typu zależności na omawianych surowcach.

Badania przeprowadzone przy użyciu mikroskopu optycznego potwierdziły wcześniejsze wyniki o zróżnicowanym rozkładzie wymiarowym porów (współczynnik zmienności CV zmierzonych średnic porów wynosił około 60% dla frakcji o wymiarze cząstek od 1 do 2,5 mm oraz ok. 30% dla frakcji o wymiarze cząstek ponad 2,5 mm, a ich średnica wynosiła od 16,97 do maksymalnie 111,64 μm).

Proces mieszania i natłuszczenia był prowadzony w warunkach kontrolowanych. Wyznaczono współczynniki zmienności na poziomie 8 lub 9%, które uznano jako wskaźnik równomiernego rozprowadzenia tłuszczu w mieszance. Natomiast mieszanie w warunkach podciśnienia nie wpłynęło istotnie na równomierność wymieszania. Ocenę jednorodności mieszania na przykładzie mieszanek paszowych prowadzili: Królczyk i Tukiendorf (2008), Zawiślak i in. (2012), którzy dla prawidłowo przeprowadzonego procesu mieszania w mieszarce typu AMA otrzymywali współczynnik zmienności na poziomie 8,2 i 11,7%.

Właściwości fizyczne nieobrabianego ciśnieniowo-termicznie surowca z identycznym dodatkiem tłuszczu płynnego (tj. 30% w stosunku do masy śruty) różniły się znacząco w stosunku do natłuszczanych ekstrudatów. Zaobserwowano, że dodatek tłuszczu płynnego do śruty pszennej lub kukurydzianej powodował wzrost gęstości, kąta usypu i zsypu surowca, natomiast otrzymany produkt charakteryzował się niską sypkością, a dodany tłuszcz nie został wchłonięty do wnętrza produktu. Przeprowadzona ocena sypkości uzyskanego koncentratu na pod-

stawie analizy zmiany kąta usypu i zsypu surowca pozwoliła na wyliczenie procentowych przyrostów tych wartości po procesie natłuszczania dla surowca obrabianego i nieobrabianego ciśnieniowo-termicznie. Dla kukurydzy nie poddanej obróbce ciśnieniowo-termicznej po natłuszczeniu wzrósł kąt usypu o ponad 70% dla frakcji najgrubszej. Natomiast koncentrat otrzymany na bazie ekstrudatu kukurydzianego po obróbce ciśnieniowo-termicznej charakteryzował się niewielką zmianą kąta usypu (4,8% dla frakcji najdrobniejszej i 3,7% dla frakcji najgrubszej). Natomiast dla koncentratu tłuszczowego na bazie pszenicy różnice te były mniejsze i wynosiły odpowiednio dla śruty frakcji najdrobniejszej 24,3%, a dla koncentratu tłuszczowego – 17%, co było spowodowane mniejszym stopniem ekspandowania pszenicy w stosunku do kukurydzy. Otrzymany produkt charakteryzował się niższym przyrostem kąta zsypu w porównaniu do natłuszczonej śruty (np.: dla śruty kukurydzianej i pszennej o rozmiarze cząsteczek pomiędzy 1 i 2,5 mm nastąpił przyrost o około 68%, natomiast dla natłuszczonego ekstrudatu o takim samym rozmiarze o 50% dla kukurydzy i 57,1% dla pszenicy), w związku z czym było łatwiejsze jego dozowanie oraz magazynowanie. Stwierdzili to w swoich pracach także Zawislak i in. (2010a), Matyka (1997, 2004), którzy otrzymali dla śruty jęczmiennej po natłuszczeniu do 20% olejem rzepakowym wzrost kąta usypu o około 42% i zsypu o około 22%.

Ponadto dokonano oceny ilości tłuszczu znajdującego się w poszczególnych frakcjach ekstrudatów. Największe ilości tłuszczu zaabsorbowały frakcje najgrubsze. W ich strukturze powstały największe pory. Wykazano doświadczalnie, iż zawartość tłuszczu w koncentracie na bazie ekstrudowanej kukurydzy była wyższa w stosunku do koncentratu na bazie ekstrudowanej pszenicy. W dostępnej literaturze nie badano tego typu zależności na omawianych surowcach.

Wytrzymałość kinetyczna jest podstawowym parametrem jakościowym granulatów. Przyjmuje się, że wytrzymałość kinetyczna wyznaczona metodą Pfosta powinna wynosić powyżej 90%. Ilość tłuszczu znajdującego się w surowcach komponujących mieszankę wyniosła 2,16%, przy wytrzymałości kinetycznej 92%. Natomiast dodatek tłuszczu płynnego do mieszanki, którego ilość wyznaczono na poziomie 6,6%, spowodował obniżenie wytrzymałości kinetycznej do nieco ponad 80%. Porównywalną wytrzymałością kinetyczną w stosunku do próby kontrolnej, charakteryzował się granulát z koncentratem tłuszczowym na bazie kukurydzy. Wynosiła ona 91,1%, przy zawartości tłuszczu w granulacie 6,33%. Natomiast granulát uzyskany z mieszanki z koncentratem na bazie ekstrudowanej pszenicy charakteryzował się wytrzymałością niższą, wynoszącą 77,1%, przy całkowitej zawartości tłuszczu w granulacie ponad 7%. Badaniami oceny wytrzymałości kinetycznej granulatów paszowych zajmowali się inni autorzy tj.: Angulo i in.

(1995), Kulig i Laskowski (2006), Wood (1987), którzy dla mieszanki DKA-Super Grower uzyskali wytrzymałość kinetyczną 87%, która zmalała po wprowadzeniu tłuszczu w ilości 4% do wartości 75%. Oceniano również wytrzymałość kinetyczną brykietów paszowych w zależności od nacisków zagęszczających (największy wzrost zaobserwowano w obszarze 50-80 MPa) i średniej wielkości cząstek w mieszance (Hejft 2002, Soevik 1998).

Istotnym parametrem pomiarowym podczas procesu granulowania jest wartość siły wytłaczającej badaną mieszankę przez otwór matrycy. Tego typu pomiary odzwierciedlają wartości jednostkowe nacisków zagęszczających. Badacze z tego zakresu dowiedli, iż wraz ze zwiększeniem długości otworów w matrycy pierścieniowej wzrastają wartości jednostkowe nacisków zagęszczających. Ponadto długość otworu w matrycy i jej prędkość obrotowa mają decydujący wpływ na stan obciążenia układu roboczego oraz energochłonność procesu, co potwierdzają badania autorów tj.: Obidziński i Hejft (2007), Hejft (2002), Laskowski i Skonecki (2001, 2004). Siła wytłaczająca mieszankę (próbę kontrolną) przez przykładowy otwór w matrycy wynosiła w granicach 6,2 kN. Natomiast dodatek tłuszczu płynnego spowodował obniżenie siły wytłaczającej do wartości 3,8 kN, przy czym nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic w wartości siły wytłaczającej po zastosowaniu koncentratu tłuszczowego do mieszanki na bazie pszenicy w stosunku do próby z tłuszczem płynnym. Jednakże wprowadzenie do mieszanki koncentratu tłuszczowego na bazie kukurydzy, po którym ogólna zawartość tłuszczu w granulacie wynosiła 6,33%, spowodowało wzrost siły wytłaczającej do wartości 4,2 kN w porównaniu z próbą z tłuszczem płynnym.

Monitorowano również obciążenie pracy silnika granulatora podczas granulowania poszczególnych mieszanek. Rejestracja była prowadzona od początku trwania procesu przez kolejne 100 sekund. Stabilizacja procesu następowała po 15-20 sekundach od rozruchu. Wraz z upływem czasu rozruchu malało obciążenie układu roboczego. Do podobnych wniosków doszli m.in. MacMahon i Payne (1991), Obidziński (2006), Hejft (2011), Hejft i Obidziński (2012), Laskowski (1989), którzy oceniali m.in. wpływ czasu docierania matrycy i rolek granulatora na energochłonność procesu. Zgodnie z oczekiwaniami największy pobór mocy nastąpił podczas granulowania mieszanki bez dodatku tłuszczu. Dodatek tłuszczu płynnego lub w postaci sypkiego koncentratu tłuszczowego na bazie pszenicy lub kukurydzy spowodował obniżenie poboru mocy do poziomu około 4 kW.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Postawione na wstępie hipotezy robocze weryfikowano przeprowadzając szereg eksperymentów związanych z obróbką ciśnieniowo-termiczną, natłuszczaniem i granulowaniem mieszanek paszowych z dodatkiem koncentratów tłuszczowych. Analiza właściwości fizycznych otrzymanych ekstrudatów po natłuszczaniu, jak i surowców przed obróbką ciśnieniowo-termiczną, wskazuje na to, że udało się połączyć ekstruzję z procesem natłuszczania oraz granulowania mieszanek paszowych. W pracy wykazano, że zgodnie z przyjętą hipotezą roboczą zastosowanie obróbki ciśnieniowo-termicznej powoduje zwiększenie ilości wchłanianego tłuszczu w strukturę ekstrudatu i jednocześnie umożliwia uzyskanie sypkiego koncentratu tłuszczowego nadającego się do zastosowania w przemyśle paszowym. Dodatkowo, czynnikiem wspomagającym proces natłuszczania, a zarazem umożliwiającym wchłonięcie większej ilości tłuszczu, jest przeprowadzanie tego procesu w podciśnieniu. Ilość wchłoniętego tłuszczu w podciśnieniu była o około 2% wyższa w porównaniu z natłuszczaniem w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Użyte w warunkach laboratoryjnych podciśnienie na niewielkim poziomie wynoszącym 500 hPa wystarczyło na zwiększenie ilości wchłoniętego tłuszczu.

Otrzymany w trakcie badań koncentrat tłuszczowy zawierał powyżej 20% tłuszczu (w zależności od wymiaru cząsteczek) i jednocześnie charakteryzował się dobrymi właściwościami zsyprnymi (kąt usypu mieści się w przedziale 42-45° dla produktu o wymiarze cząstek pomiędzy 1 a 2,5 mm). Badania procesu granulowania oraz pomiaru wytrzymałości kinetycznej uzyskanego granulatu potwierdziły pozytywne cechy stosowania koncentratu tłuszczowego. Energochłonność procesu granulowania nie wzrosła podczas granulowania mieszanki z koncentratem tłuszczowym w porównaniu z granulowaniem mieszanki z dodatkiem tłuszczu płynnego.

Wnioski:

1. Przeprowadzone badania pozwoliły określić i ocenić uwarunkowania oraz ściśle zależności pomiędzy obróbką ciśnieniowo-termiczną a natłuszczaniem przetworów zbożowych. Wykazano, iż zaproponowana metoda obróbki pszenicy i kukurydzy ma istotny wpływ na wchłanianie tłuszczu, a tym samym zmianę wybranych właściwości fizycznych. Decydującym czynnikiem otrzymania odpowiedniego ekstrudatu do natłuszczania jest przeprowadzenie procesu ekstruzji w warunkach zapewniających wysoki stopień ekspandowania, które są zależne od właściwości fizycznych i chemicznych surowca oraz typu ekstrudera.

2. Uzyskane wyniki badań dotyczące zakresu zmian właściwości fizycznych zbożowego koncentratu tłuszczowego potwierdzają pozytywny wpływ obróbki ciśnieniowo-termicznej na sypkość uzyskanego produktu. Stwierdzono przy tym wysoką korelację pomiędzy zastosowanym surowcem a wskaźnikami oceny sypkości koncentratu.

3. Na podstawie wyników badań dotyczących energochłonności procesu granulowania stwierdzono, że dodatek otrzymanego koncentratu tłuszczowego nie wpływa istotnie na wzrost energochłonności procesu granulowania (pobór mocy wynosił 3,891 kW) w porównaniu z tradycyjną metodą dodatku tłuszczu płynnego (dla której pobór mocy wynosił 3,928 kW).

4. Zaproponowana metoda natłuszczania ekstrudatów pszennych i kukurydzianych pozwala na wprowadzenie do ich struktury ponad 20% tłuszczu przy wykorzystaniu tradycyjnych mieszarek stosowanych w przemyśle paszowym. Udowodniono zależność, że wraz z rosnącymi wymiarami ekstrudatów wzrasta ilość wchłoniętego tłuszczu.

5. Badania adsorpcji i desorpcji gazu w ekstrudatach wykazały, że powstałe pory mają kształt „gruszkowaty”. Badając porowatość materiału oraz rozmieszczenie porów w ekstrudatach stwierdzono, że największą równomierność w zakresie średnic powstałych porów zaobserwowano we frakcji najdrobniejszej (0-1 mm), a ich średnica wynosiła od około 50 do 100 μm . Nie ma to jednak wpływu na wzrost ilości wchłoniętego tłuszczu.

6. Wprowadzenie do mieszanki paszowej wytworzonego koncentratu tłuszczowego w ilości 25% pozwala na podniesienie zawartości tłuszczu o około 4%.

7. Opracowana na podstawie wyników badań koncepcja wykorzystania przetworzonej pszenicy i kukurydzy na sypki koncentrat tłuszczowy w produkcji pasz przemysłowych może być bezpośrednio zastosowana w praktyce. Miaraą użytecznych wartości przeprowadzonych badań jest zgłoszenie w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej patentu dotyczącego aplikacji techniki ekstruzji w natłuszczaniu mieszanek paszowych.

8. PIŚMIENNICTWO

- Abecassis J., Abbou R., Chaurand M., Morel M.H., Veronoux P., 1994. Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature, and pressure in the extruder and on pasta quality. *Cereal Chemistry*, 71, 247-253.
- Akgiray Ö., Saatçi A.M., 2001. Water science and technology. *Water Supply*, 1, 2, 65-72.
- Altan A., McCarthy K.L., Maskan M., 2008. Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(9), 1648-1659.
- Anderson S., 1994. Large rotor high speed hammermills: beyond screen size. *Feed Management*, 45, 20-22.
- Andersson Y., Hedlung B., 1990. Extruded wheat flour: correlation between processing and product quality parameters. *Food Quality and Preference*, 2, 201-216.
- Angulo E., Brufau J., Esteve-Garcia E., 1995. Effect of sepiolite on pellet durability in feeds differing in fat and fibre content. *Animal Feed Science and Technology*, 53, 233-241.
- Arámbula-Villa G., Guitiérrez-Árias E., Moreno-Martinez E., 2007. Thermal properties of maize masa and tortillas with different components from maize grains, and additives. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 55-60.
- Arhaliass A., Legrand J., Vauchel P., Fodil-Pacha F., Lamer T., Bouvier J.-M., 2009. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 186-193.
- ASAE Standard (No.S303.4), 2007. Test Procedure for Solids-Mixing Equipment for Animal Feeds.
- Barres C., Vergenes B., Tayeb J., Della Valle G., 1990. Transformation of wheat flour by extrusion cooking: Influence of screw configuration and operating conditions. *Cereal Chemistry*, 67, 5, 427-433.
- Barret A.M., Peleg M., 1992. Extrudate cell structure-texture relationship. *Journal of Food Science*, 53, 1464-1469.
- Barrett E.P., Joyner L.G., Halenda P.H., 1951. The determination of pore volume and area distributions in porous substances-I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73, 373-380.
- Berbec S., Błaziak S., Fornal J., Matyka S., Nowak J., Wiśniewski J., Zawisław K., 1980. Zgłoszenie Patentowe nr P.210063. Pastewny koncentrat tłuszczowo-białkowy. CLPP.
- Bhattacharya M., Hanna M.A., 1987. Texture properties of extrusion-cooked corn starch. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 20(4), 195-201.
- Bockish M., 1998. Composition, structure, physical data, and chemical reactions of fats and oils, their derivatives, and their associates. In M. Bockish (Ed.). *Fats and oils handbook*. Illinois, USA, AOCS.
- Brent J.L., Jr., 1989. Principles of extrusion cooking technology: single- and twin screw extruders. In: *Advances in Extrusion Technology*. Lancaster, PA, Technomic Publishing Company, Inc.
- Brnčić M., Bosiljkov T., Ukrainczyk M., Tripalo B., Rimac Brnčić S., Karlović S., Karlović D., Ježek D., Vikić Topić D., 2011. Influence of whey protein addition and feed moisture content on chosen physicochemical properties of directly expanded corn extrudates, *Food and Bioprocess Technology*, 4, 7, 1296-1306.

- Brnčić M., Tripalo B., Ježek D., Semenski D., Drvar N., Ukrainczyk M., 2006. Effect of twin-screw extrusion parameters on mechanical hardness of direct-expanded extrudates. *Sadhana*, 31(5), 527-536.
- Brunauer S., Emmett P.H., Teller E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60, 309-319.
- Case S.E., Hamann D.D., Schwartz S.J., 1992. Effect of starch gelatinization on physical properties of extruded wheat and corn based products. *Cereal Chemistry*, 69, 401-409.
- Chevanan N., Rosentrater K.A., Muthukumarappan K., 2007. Twin-screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chemistry*, 84(5), 428-436.
- Chevanan N., Rosentrater K.A., Muthukumarappan K., 2010. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 111-120.
- Chinnaswamy R., Hanna M.A., 1988. Optimum extrusion-cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *Journal of Food Science*, 53(3), 834-836.
- Chochułowa J., Skomial J., 1994. *Żywnienie zwierząt i paszownictwo*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Czachor G., 2008. Koncepcja metody wyznaczania współczynnika porowatości materiałów o budowie komórkowej. *Inżynieria Rolnicza*, 4(102), 181-188.
- Czachor H., 2005. Próba zastosowania stopu Wood'a do oznaczeń makroporowatości gleby. *Acta Agrophysica*, 6(1), 43-52.
- Desrumaux A., Bouvier J.M., Burri J., 1998. Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. *Journal of Food Science*, 63, 857-863.
- Dutkiewicz D., Dowgiałło A., 2005. Możliwość wykorzystania świeżych surowców rybnych do wytwarzania wysokobiałkowych pasz metodą ekstruzji. *Inżynieria Rolnicza*, 11 (71), 95-99.
- Dziki D., Laskowski J., 2010. Study to analyze the influence of sprouting of the wheat grain on the grinding process. *Journal of Food Engineering*, 96, 4, 562-567.
- Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T., 2006. Wpływ dodatku gryki na własności ekstrudatu kukurydzianego. *Inżynieria Rolnicza*, 7(82), 155-161.
- Ekielski A., Majewski Z., Żelaziński T., 2007. Wpływ wybranych parametrów ekstruzji mieszanek kukurydzianych na energochłonność procesu. *MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 9, 56-62.
- Ergun S., 1952. *Chem. Process Eng. London*, 48, 89.
- Fletcher S.I., Richmond P., Smith A.C., 1985. An experimental study of twin screw extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering*, 4, 291-312.
- Friedman H.I., Nylund B., 1980. Intestinal fat digestion, absorption and transport. *American Journal of Clinical Nutrition*, 33, 1108-1139.
- Gąsiorowski H., 2005. Kukurydza. Część 1. Wiadomości ogólne. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 10, 31-33.
- Ghorpade V.M., Bhatnagar S., Hanna M.A., 1997. Structure characteristics of corn protein isolate or wheat gluten. *Plant Foods for Human Nutrition*, 51, 109-123.
- Gomez M. H., Aguilera J.M., 1983. Changes in the starch fraction during extrusion-cooking of corn. *Journal of Food Science*, 48(2), 378-381.

- Gomez M.H., Aguilera J.M., 1984. A physicochemical model for extrusion of corn starch. *Journal of Food Science*, 49(1), 40-43.
- Gregg S.J., Sing K.S.W., 1967. Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press, London.
- Grochowicz J., 1996. Technologia produkcji mieszanek paszowych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Grochowicz J., 2001. Karma dla psów, kotów i innych małych zwierząt domowych i ryb. PAGROS S.C. Lublin.
- Hajnos M., Lipiec J., Świeboda R., Sokołowska Z., Witkowska-Walczak B., 2006. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods. *Geoderma*, 135, 307-314.
- Hejft R., 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE Radom.
- Hejft R., 2011. Granulowanie i brykietowanie słomy. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 50, 1, 13-14.
- Hejft R., Obidziński S., 2012. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych – innowacje technologiczno-techniczne. Część I. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(1), 63-65.
- Jamroz D., Podkówa W., Chachułowa J., Praca zbiorowa 2006. Żywnienie zwierząt i paszoznawstwo. Pashoznawstwo. Tom III. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Jerocha H., Lipiec A. (pod redakcją) 2012. Pasze i dodatki paszowe. PWRiL, Warszawa.
- Jurga R., 2002. Przemiał ziarna pszenicy. Inne rodzaje rozdrabniaczy stosowane do ziarna i młewa. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 4, 38-40.
- Kasprowicz-Potocka M., 2011. Aminokwasy z „drugiego” planu. *Ogólnopolskie Czasopismo Specjalistyczne. Trzoda Chlewna*, 5, 58-61.
- Kirby A. R., Ollet A. L., Parker R., Smith A.C., 1988. An experimental study of screw configuration effects in the twin screw extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering*, 8, 247-272.
- Kłoczek B., 1997. Zmiany wartości energetycznej pasz podczas przetwarzania. Materiały konferencyjne pt.: „Energetyczne dowartościowanie pasz przemysłowych”. CLPP, Lublin, 31-38.
- Kokini J.L., Ho C.T., Karwe M.V., 1992. Food extrusion and technology. New York, NY: Marcel Dekker.
- Konstankiewicz K., Książkowska A., Skawiński J., 1998. Zastosowanie porozymetrii rtęciowej do badań mikrostruktury materiałów rolniczych. *Zeszyty PPNR*, 461, 503-521.
- Królczyk J., Tukiendorf M., 2008. Research on the impact of mass fractions of multi-element granular structure on the mixing process. *Int. Agrophysics*, 22, 45-52.
- Kulig R., Laskowski J., 2002. Pomiary zużycia pary wodnej w procesie kondycjonowania surowców i mieszanek paszowych. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (24), 134-141.
- Kulig R., Laskowski J., 2005. Wpływ zawartości tłuszczu na proces granulowania materiałów paszowych. *Inżynieria Rolnicza*, 7, 59-68.
- Kulig R., Laskowski J., 2006. Nakłady energii w procesie granulowania śruty pszennej o różnym stopniu rozdrobnienia. *Motorol*, 8A, 187-192.

- Kulig R., Skonecki S., Laskowski J., 2011. Wpływ składu surowcowego mieszanek DKA-S i DKA-G na efektywność procesu granulowania. *Inżynieria Rolnicza*, 1(126), 123-128.
- Laskowski J., 1989. Studia nad procesem granulowania mieszanek paszowych. Praca habilitacyjna. Wydawnictwo AR, Lublin.
- Laskowski J., Skonecki S., 2001. Badania procesów aglomerowania surowców paszowych-aspekt metodyczny. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 187-193.
- Laskowski J., Skonecki S., 2004. Wpływ masy materiału i średnicy komory na parametry zagęszczania ziarna pszenicy. *Inżynieria Rolnicza*, 5 (60), 195-204.
- Leśnikowski J., 2002. Przyrząd do pomiaru porowatości wykorzystujący metodę objętościowo-ciśnieniową. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 7-8, 65-68.
- Lipiec A., Pisarski R.K., 2010. Paszoznawstwo. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, Lublin.
- Lipiec J., Hajnos M., Świeboda R., 2012. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, 179-180, 20-27.
- Lisowa H., Haman J., Lis T., 1976. Właściwości cieplne ciał kapilarno-porowatych i metody ich pomiaru. *Problemy Agrofizyki*, WPAN.
- MacMahon M.J., Payne J.D., 1991. *The Pelleting Handbook*, Borregaard Lignotech, Sarpsborg, Norway.
- Matyka S., 1997. Natłuszczenie jako sposób poprawy wartości energetycznej pasz przemysłowych. Materiały konferencyjne pt.: „Energetyczne dowartościowanie pasz przemysłowych”. CLPP, Lublin, 23-29.
- Matyka S., 2004. Substytucja surowców (materiałów paszowych) w paszach przemysłowych. *Pasze Przemysłowe*, 7/8, 2-5.
- Matyka S., 2007. Towaroznawstwo materiałów paszowych i dodatków paszowych. Wydział Inżynierii Produkcji, AR Lublin.
- Matyka S., Jaśkiewicz T., Sagan A., 1999. Surowce przemysłu spożywczego. Przewodnik do ćwiczeń. Wydanie pierwsze. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Michaelsen T.E., Heidenreich H.E., 1997. Termisch-mechanische Veredlung von Futtermitteln und Futtermittelkomponenten. *Die Mühle + Mischfuttertechnik*, 129, 47, 667-670.
- Miller R.C., 1988. Continuous cooking of breakfast cereals. *Cereals Foods World*, 33(3), 284-291.
- Mościcki L., 1999. Ekstruzja i jej zastosowanie w przetwórstwie rolno-spożywczym. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 43, 1, 18-20.
- Mościcki L., 1999a. Ekstruzja i jej zastosowanie w przetwórstwie rolno-spożywczym. Cz.6: Produkcja karmy dla zwierząt domowych i ryb. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 6, 19-21.
- Mościcki L., 2003. Zbożowa galanteria śniadaniowa. Cz. I. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 9, 24-26.
- Mościcki L., Mitrus M., Wojtowicz A., 2007. Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym. PWRiL, Warszawa.
- Moutinho I., Figureiredo M., Ferriera P., 2007. Evaluating the surface energy of laboratory-made paper sheets by contact angle measurement. *Tappi J.*, 6, 6, 26.
- Niedziółka I., Szymanek M., 2003. Przemysłowe i energetyczne wykorzystanie ziarna kukurydzy. *MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 5, 115-121.
- Niskanen K., 1998. *Paper Physics*. Tappi Press, Atlanta, 14.

- Obidziński S., 2006. Wpływ czasu docierania matrycy pierścieniowej na obciążenia w układzie roboczym granuladora w procesie granulowania pasz. *Inżynieria Rolnicza*, 7, 343-349.
- Obidziński S., Hejft R., 2007. Wpływ parametrów aparaturowo-procesowych na wartości nacisków zagęszczających w procesie granulowania pasz. *Inżynieria Rolnicza*, 5(93), 313-319.
- Padmanabhan M., Bhattachayrya M., 1989. Extrudate expansion during extrusion cooking of foods. *Cereal Food World*, 34, 945-949.
- Pazdro Z., 1983. *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa, 60-65.
- PN –EN ISO 712:2009. Ziarno zbóż i przetwory zbożowe – Oznaczanie wilgotności. Metoda odwoławcza.
- PN-EN ISO 7971-1:2010. Ziarno zbóż – Oznaczanie gęstości w stanie zsypanym, zwanej masą hektolitrową. Część 1. Metoda odwoławcza.
- PN-EN ISO 8460:1999. Oznaczanie gęstości nasypowej swobodnej i gęstości nasypowej ubitej.
- Przegaliński A., 1969. *Produkcja pasz w gospodarstwie*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Ruszczyc Z., 1983. *Żywnienie zwierząt i paszoznawstwo*. PWRiL.
- Sensoy I, Robert T. Rosen, Chi-Tang Ho, Karwe M.V., 2005. Effect of processing on buckwheat phenolics and antioxidant activity. *Food Chem.*, 99.
- Seong-Koon Lo, Chin-Ping Tan, Kamariah Long, Mohd. Suria Affandi Yusoff, Oi-Ming Lai., 2008. Diacylglycerol oil properties, processes and products: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 3, 223-233.
- Shannon D., Robert H.-N., Tyler T., 2010. Effect of protein, moisture content and barrel temperature on the physicochemical characteristics of pea flour extrudates. *Food Research International*, 43, 659-663.
- Skowroński J.W. , 2010. Porównawcza ocena testów penetracji wody w papier. Część 1. Charakterystyka zjawiska i konwencjonalne metody pomiarowe, *Przegl. Papiern.*, 66, 5, 271.
- Sobczak P., 2003. Porównanie wybranych właściwości fizycznych różnych aglomeratów uzyskanych metodą ekstruzji. *Inżynieria Rolnicza*, 7(49), 175-180.
- Soevik T., 1998. Relationship between analyzed and theoretical content of diethylether extractable fat in standardized commercial feed mixtures for farm animals. *Animal Feed Science and Technology*, 79, 65-77.
- Soszka M., 2011. Znaczenie rozdrobnienia surowców paszowych. *Ogólnopolskie Czasopismo Specjalistyczne. Trzoda Chlewna*, 4, 43-47.
- Thomas M., van Zuilichem D.J., van der Poel A.F.B., 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions, *Anim. Feed Sci. Tech.*, 64, 173-192.
- Thymi S., Krokida M.K., Pappa A., Maroulis Z.B., 2005. Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering*, 68, 519-526.
- Vainionpää J., 1991. Modeling of extrusion cooking of cereals using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 13, 1-26.
- Witrowa-Rajchert D., 2003. Badanie zmian objętości suszonej tkanki roślinnej podczas dehydratacji. *Acta Agrophysica*, 2(4), 867-878.
- Wojdalski J., Domagała A., Kaleta A., Janus P., 1998. *Energia i jej użytkowanie w przemyśle rolnospożywczym*, Wydawnictwo SGGW.

- Wood J.F., 1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*, 18, 1-17.
- Žák K., Bain J., 1988. Pórovitost roslinných materiálů. *Zemědělska Technica*, 34, 481-491.
- Zawiślak K., 1997. Metody natłuszczania pasz. *Pasze Przemysłowe*, 5, 20-22.
- Zawiślak K., 1996. Czynniki wpływające na jakość granulatu. *Pasze Przemysłowe*, 2-3, 15-16.
- Zawiślak K., Sobczak P., Panasiewicz M., 2010a. Wpływ składu surowcowego na jakość pasz granulowanych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 546, 375-381.
- Zawiślak K., Sobczak P., Panasiewicz M., Markowska A., 2010. Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość kinetyczną granulatu. *Acta Sci. Pol., Technica Agraria*, 9(1-2), 3-10.
- Zawiślak K., Sobczak P., Węldycz A., 2012. Mixing as CCP in the production of industrial feed. *Journal Central European Agriculture*, 13(3), 545-553.
- Zhang B., Haitaob L., Zhaoa D., Guoa Y., Barri A., 2011. Effect of fat type and *lysophosphatidylcholine* addition to broiler diets on performance, apparent digestibility of fatty acids, and apparent metabolizable energy content. *Animal Feed Science and Technology*, 163, 177-184.
- Zogzas N.P., Maroulis Z.B., Marinou-Kouris D., 1994. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12(7), 1653-1666.

9. STRESZCZENIE

Badania dotyczące zastosowania obróbki ciśnieniowo-termicznej w wytwarzaniu sypkich koncentratów tłuszczowych, przedstawione w niniejszej monografii, zostały podjęte po szczegółowej analizie literatury. Dotychczasowe prace badawcze koncentrowały się głównie na metodach wprowadzania tłuszczu do mieszanki lub gotowego granulatu przez rozwiązania konstrukcyjne urządzeń lub metod natłuszczania (np.: natłuszczanie przez dysze, natłuszczanie w kondycjonery). W literaturze opisano różne koncepcje badań dotyczących wytrzymałości granulatu z dodatkiem tłuszczu w różnych dawkach oraz w zależności od metody natłuszczania. Prowadzono również badania związane z produkcją koncentratów sypkich opartych na mieszance różnych surowców. W skład takich mieszanek wchodziły m.in. otręby pszenne, śruta kukurydziana, susz z zielonek, drożdże pastewne i tłuszcz. Negatywną cechą takich koncentratów jest konieczność posiadania wielu surowców do ich produkcji oraz skomplikowany proces technologiczny. Ponadto niektóre z wytworzonych koncentratów tłuszczowych nie nadają się do mieszanek drobiowych ze względu na wysoką zawartość włókna.

Tendencja czy wręcz konieczność wprowadzania na rynek nowych, dobrych jakościowo produktów wymusza potrzebę poszukiwania nowych metod i sposobów obróbki surowców. Tego typu trend pozwoli realizować wyzwania stawiane przez rynek i konkurencję. Stąd też w założeniach pracy uwzględniony został dobór różnych etapów przetwarzania ekstrudatu w kontekście otrzymania produk-

tu o wysokiej zawartości tłuszczu, a jednocześnie nadającego się do łatwego dozowania i mieszania w mieszarkach paszowych.

Realizacja postawionego celu wymagała przeprowadzenia szeregu badań związanych z doбором parametrów ekstruzji, rozdrabniania, natłuszczania i aplikacji uzyskanego koncentratu jako komponentu w granulowanych mieszankach paszowych.

W pracy potwierdzono, iż zastosowanie obróbki ciśnieniowo-termicznej powoduje zwiększenie ilości wchłanianego tłuszczu w strukturę ekstrudatu i jednocześnie umożliwia uzyskanie sypkiego koncentratu tłuszczowego odpowiedniego do zastosowania w przemyśle paszowym. Dodatkowo, czynnikiem wspomagającym proces natłuszczania, a zarazem umożliwiającym wchłonięcie większej ilości tłuszczu, jest przeprowadzanie tego procesu w podciśnieniu. Ilość wchłoniętego tłuszczu w podciśnieniu była o około 2% wyższa w porównaniu z natłuszczaniem w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Uzyskane w warunkach laboratoryjnych podciśnienie na niewielkim poziomie wynoszącym 500 hPa było wystarczające do tego, aby nastąpiło zwiększenie ilości wchłoniętego tłuszczu. Otrzymany w trakcie badań dodatek paszowy zawierał powyżej 20% tłuszczu (w zależności od wymiaru cząsteczek) i jednocześnie charakteryzował się dobrymi właściwościami zsympnymi (kąt usypu mieści się w przedziale 42-45° dla produktu o wymiarze cząstek pomiędzy 1 a 2,5 mm). Badania procesu granulowania oraz pomiaru wytrzymałości kinetycznej uzyskanego granulatu potwierdziły pozytywne cechy stosowania uzyskanego koncentratu tłuszczowego. Energochłonność procesu nie wzrosła podczas granulowania mieszanki z koncentratem tłuszczowym w porównaniu z granulowaniem mieszanki z dodatkiem tłuszczu płynnego.

Przeprowadzone badania jednoznacznie potwierdziły, że pszenica i kukurydza poddane obróbce ciśnieniowo-termicznej charakteryzują się wysokim stopniem ekspandowania oraz wysoką porowatością. Otrzymany ekstrudat stanowi doskonały materiał do dalszego procesu, a przetwarzane surowce roślinne są podstawowym składnikiem mieszanek paszowych.

Słowa kluczowe: koncentrat tłuszczowy, ekstruzja, pasze, granulowanie

10. SUMMARY

APPLICATION OF EXTRUSION-COOKING TREATMENT IN THE PRODUCTION OF GRAIN-FAT CONCENTRATES FOR FEED

The presented research on the application of extrusion-cooking in the production of grain-fat concentrates in this monograph was preceded by literature analysis. The past research mainly concentrated on the methods of fat addition to the mixture or pellet greasing by different machinery construction (e.g. greasing through nozzles, greasing in a conditioner). Many studies were performed on the pellet durability after various levels of fat addition or depending on the greasing method. Research was also conducted on the production of bulk concentrate mixtures based on different raw materials. The composition of those blends comprised: wheat bran, maize meal, dried green grass, fodder yeast and fat. The disadvantage of such concentrates is the necessity of having a number of raw materials for their production, and an extended technological process. Some of the produced fatty concentrates are not suitable for poultry compound because of their high fibre content.

The tendency or even the necessity of implementation of new high-quality products forces to search for new methods and ways of raw materials processing which will realize the challenges posed by the market or the competition. According to those requirements, the concept of various stages of extrudate processing was realized in the context of the achievement of high fat concentrates suitable for easy dosing and mixing in feed mixers.

The realization of this purpose required a number of studies related to the selection of parameters of extrusion, grinding, greasing and concentrate applications in pelleted feed as a component.

The paper presents the results of the application of the extrusion cooking process as a treatment for increasing the amount of fat absorbed into the extrudate structure. It allows to achieve a bulk fat concentrate suitable for application in the feed industry. In addition, the mixture greasing process conducted under the conditions of negative pressure allows to achieve greater absorption of fat. The amount of fat absorbed at negative pressure conditions was approximately 2% higher compared to greasing at atmospheric pressure. The low negative pressure level of 500 hPa achieved in the laboratory mixer was enough to increase the amount of fat absorbed. The feed additive obtained during the study contained more than 20% of fat (depending on particle size), and it was also characterised by high bulk properties (angle of repose is on the level from 42 to 45° for the

product of particle size between 1 and 2.5 mm). The study of granulation process and pellets durability confirmed the positive application of the fat concentrate. Energy consumption of the pelleting process is not increased after the addition of fat concentrate compared with the liquid fat addition to the mixture.

The conducted research demonstrated that materials after extrusion cooking process are characterised by a high degree of expansion and high porosity. The resulting extrudate is an excellent material for further processing, and processed plant materials are an essential component of feed mixtures.

Keywords: fat concentrate, extrusion cooking process, feed, pelleting

Adres Autora

Paweł Sobczak
Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych,
Wydział Inżynierii Produkcji,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin
e-mail: pawel.sobczak@up.lublin.pl

Address of Author

Paweł Sobczak
Department of Food Engineering and Machinery,
Faculty of Production Engineering
University of Life Sciences in Lublin,
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin, Poland
e-mail: pawel.sobczak@up.lublin.pl