

Załącznik II

AUTOREFERAT

Opis dorobku i osiągnięć naukowych

Dr Marcin Mitrus

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Wydział Inżynierii Produkcji

Katedra Techniki Ciepłej i Inżynierii

Procesowej

ul. Doświadczalna 44

20-280 Lublin

e-mail: marcin.mitrus@up.lublin.pl

Lublin 2018

SPIS TREŚCI

1. Dane personalne.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia.....	4
4.1. Określenie osiągnięcia	4
4.2. Wprowadzenie.....	5
4.3. Cel i zakres osiągnięcia.....	9
4.4. Omówienie osiągnięcia naukowego.....	9
4.5. Podsumowanie.....	25
4.6. Literatura.....	28
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	30
6. Podsumowanie dorobku naukowo-badawczego.....	35

1. DANE PERSONALNE

Imię i nazwisko: **Marcin Mitrus**
Miejsce pracy: **Dr Marcin Mitrus**
Katedra Techniki Ciepłej i Inżynierii Procesowej
Wydział Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
Ul. Doświadczalna 44
20-280 Lublin

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE – Z PODANIEM ICH NAZWY, MIEJSCA I ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

- a) **magister**, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Matematyki i Fizyki, kierunek: Fizyka, specjalność: Fizyka doświadczalna, 16.10.1995 r., temat pracy: „*Technologia i badanie własności nadprzewodników wysokotemperaturowych*”; promotor: dr hab. Zbigniew Korczak,
- b) **doktor nauk rolniczych** w dyscyplinie naukowej: Inżynieria rolnicza, specjalność: Inżynieria i aparatura przemysłu spożywczego, Rada Wydziału Inżynierii Produkcji Akademii Rolniczej w Lublinie, 03.06.2004 r., temat pracy doktorskiej: „*Wpływ obróbki barotermicznej na zmiany właściwości fizycznych biodegradowalnych biopolimerów skrobiowych*”, promotor: prof. dr hab. Leszek Mościcki, recenzenci: prof. dr ir. Leon P.B.M. Janssen, doc. dr hab. inż. Bohdan Dobrzański, dr hab. Stanisław Pietruszewski.

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

01.09.1996 – 01.10.2004	Stanowisko: asystent, Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej (od 01.10.2003 r. Wydział Inżynierii Produkcji), Katedra Inżynierii Procesowej
01.10.2004 – 31.08.2017	Stanowisko: adiunkt, Akademia Rolnicza w Lublinie (od 17.04.2008 r. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie), Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Inżynierii Procesowej

01.09.2017 – obecnie Stanowisko: adiunkt, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Techniki Ciepłej i Inżynierii Procesowej, Zakład Inżynierii Procesowej

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16. UST.2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. USTAW NR 65, POZ. 595, ZE ZMIANAMI: DZ. U. Z 2005 R. NR 164, POZ. 1365, ORAZ DZ. U. Z 2001 R., NR 84, POZ. 455):

4.1. OKREŚLENIE OSIĄGNIĘCIA

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

„MODYFIKACJA SKROBI METODĄ EKSTRUZJI NA CELE SPOŻYWCZE I OPAKOWANIOWE”

Osiągnięcie dokumentuje cykl 9 publikacji powiązanych tematycznie, wydanych po uzyskaniu przez wnioskodawcę stopnia naukowego doktora.

b) wykaz prac dokumentujących osiągnięcie naukowe:

O1. Wójtowicz A., **Mitrus M.**, Mościcki L., 2008. Modyfikacja skrobi metodą ekstruzji. W: Dobrzański Jr B., Grundas S., Rybczyński R. Metody Fizyczne Diagnostyki Surowców Roślinnych i Produktów Spożywczych, Komitet Agrofizyki PAN, Wyd. Naukowe FRNA, ISBN 978-83-60489-08-6, 157-170. (7 pkt wg MNiSW^b).

O2. **Mitrus M.**, Oniszczyk T., Mościcki L., 2011. Changes of specific mechanical energy during extrusion-cooking of potato starch. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., XIc, 200-207. (6 pkt wg MNiSW^b).

O3. **Mitrus M.**, Combrzyński M., 2013. Energy consumption during corn starch extrusion-cooking. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. 13(2), 63-66. (6 pkt wg MNiSW^b).

O4. **Mitrus M.**, Wójtowicz A. Mościcki L., 2010. Modyfikacja skrobi ziemniaczanej metodą ekstruzji. Acta Agrophysica, 16(1), 101-109. (6 pkt wg MNiSW^b).

O5. **Mitrus M.**, Wójtowicz A., 2011. Extrusion-cooking of wheat starch. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., XIc, 208-215. (6 pkt wg MNiSW^b).

- O6. **Mitrus M.**, Wójtowicz A., Oniszczyk T., Gondek E., Mościcki L., 2017. Effect of processing conditions on microstructure and pasting properties of extrusion-cooked starches. *International Journal of Food Engineering*, 13(6), DOI: 10.1515/ijfe-2016-0287. (15 pkt wg MNiSW^b; IF₂₀₁₆=0,685^a).
- O7. **Mitrus M.**, Moscicki L., 2014. Extrusion-cooking of starch protective loose-fill foams. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 778-783. (30 pkt wg MNiSW^b; IF₂₀₁₄=2,348^a).
- O8. **Mitrus M.**, Wójtowicz A., Oniszczyk T., Mościcki L., 2012. Rheological properties of extrusion-cooked starch suspensions. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.*, 12, 143-147. (6 pkt wg MNiSW^b).
- O9. **Mitrus M.**, Wójtowicz A., 2011. Wybrane cechy jakościowe przekąsek ekstrudowanych z dodatkiem skrobi modyfikowanych. *Acta Agrophysica*, 18(2), 335-345. (5 pkt wg MNiSW^b).

ŁĄCZNIE (OSIĄGNIĘCIE):

- | | |
|-----------------|--------------------|
| - Impact factor | 3,033 ^a |
| - Punkty MNiSW | 87 ^b |

^a IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2017 podano ostatni dostępny IF₂₀₁₆

^b Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2017 przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2016

Wkład wnioskodawcy w powstanie każdej z ww. publikacji obejmował autorstwo hipotez i koncepcji badawczych oraz wykonanie doświadczeń, analizę, opracowanie wyników badań i dyskusję, jak również przygotowanie manuskryptów. Oświadczenia współautorów, wraz z określeniem ich indywidualnych wkładów w powstanie prac zawarte są w zał. III.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.2. WPROWADZENIE

Skrobie modyfikowane są to substancje otrzymane w wyniku działania na skrobie spożywcze jednego lub więcej czynników chemicznych, fizycznych lub enzymów, stąd też przyjęto adekwatne nazewnictwo: skrobie modyfikowane chemicznie, fizycznie lub enzymatycznie. Celem modyfikacji jest dopasowanie skrobi do odpowiednich warunków

procesów technologicznych tak, by zapewnić powstanie określonej postaci produktu o odpowiedniej trwałości podczas przechowywania.

Charakter budowy skrobi pozwala na wprowadzenie w jej strukturze i składzie takich zmian, które zmniejszają lub usuwają wady ograniczające możliwość jej stosowania. W trakcie modyfikacji można uzyskać m.in.: zmiany rozpuszczalności i hydrofilności skrobi, temperatury kleikowania i żelowania, lepkości, adhezyjności, zdolności tworzenia filmu, zmiany fizycznych cech żelu lub roztworu, charakter jonowy, skłonność do retrogradacji i synerezy, itp. Dzięki temu można je stosować w wielu gałęziach przemysłu (Harper, 1981; Mercier i in., 1989; Thomas i Atwell, 1997; Mościcki i in., 2007; Moscicki i Janssen, 2011; Oniszczyk i in., 2015), m.in.:

- spożywczym – jako stabilizatory poprawiające właściwości reologiczne produktu, substancje żelujące, zagęszczające;
- opakowaniowym – produkcja biodegradowalnych materiałów opakowaniowych w postaci folii, opakowań sztywnych oraz wypełniaczy (pianek);
- chemicznym – kleje suche i pastowe, kleje do tapet, flokulanty skrobiowe;
- włókienniczym – środki klejące i barwiące tkaniny;
- papierniczym – do klejenia masy papierniczej i powlekania papieru;
- budowlanym – wytwarzanie płyt gipsowych z surowców wtórnych;
- mineralnym - brykietowanie węgla;
- farmaceutycznym - jako czynnik wiążący masę tabletkową.

Chemiczna modyfikacja skrobi polega na podstawieniu niewielkiej części grup hydroksylowych lub wytworzeniu w cząsteczce skrobi nowych grup funkcyjnych z zastosowaniem czynników utleniających. Podczas tego procesu jednocześnie zachodzi rozrywanie pierścieni piranozowych lub łańcucha polimerowego, co powoduje zmianę właściwości chemicznych i fizycznych skrobi (Singh i in., 2007; Wilska-Jeszka, 1994).

Modyfikacja chemiczna skrobi, mająca na celu zmiany właściwości chemicznych i fizycznych skrobi, prowadzona jest w reaktorach chemicznych z ciągłym mieszaniem. W celu uniknięcia problemów z mieszaniem, lepkość mieszanin skrobi musi być mała, a to znaczy, że nie można stosować zawiesin zawierających zbyt duży procent masowy skrobi przypadający na 1 kg wody. W przypadku procesu kleikowania cząsteczki skrobi rozpuszczają się w wodzie znacznie zwiększając lepkość całej mieszaniny. Proces ten inicjowany jest w temperaturze powyżej 60°C i prowadzi się go w mieszkach zawierających dużą ilość wody i soli, która jest dodawana w celu zintensyfikowania jego przebiegu. Niestety, z końcowego produktu należy usunąć sól, co powoduje wzrost kosztów.

Kolejnym czynnikiem zwiększającym koszt całego procesu jest mała selektywność reakcji. Ponieważ najbardziej reaktywnym miejscem cząsteczki D-glukozy (podstawowego składnika tworzącego skrobię) jest grupa alkoholowa, większość modyfikacji odbywa się w tej grupie. Składniki chemiczne mogące reagować z grupą alkoholową D-glukozy mogą reagować także z wodą, która jest zawsze obecna w zawiesinach skrobi (de Graff, 1996).

W metodach enzymatycznych modyfikacji skrobi wykorzystuje się zjawisko hydrolizy skrobi z zastosowaniem enzymów wytwarzanych przez drobnoustroje lub dodawanych do skrobi, najczęściej są to α - lub β -amylazy.

Najprostszą metodą fizycznej modyfikacji skrobi jest obróbka termiczna. W wyniku ogrzewania ulega zniszczeniu struktura ziaren skrobiowych i zachodzi częściowe kleikowanie. Dochodzi do rozrywania wiązań wodorowych, stabilizujących trzecio- i czwartorzędową strukturę konformacyjną makrocząsteczek (van den Einde i in., 2003). Jeżeli z układu zostanie szybko usunięta woda, na przykład przez suszenie rozpyłowe lub bębnowe, pierwotna struktura skrobi nie zostaje odtworzona i otrzymuje się skrobię modyfikowaną, która tworzy dyspersję w zimnej wodzie.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą otrzymywania skrobi modyfikowanej fizycznie jest suszenie. W metodzie tej 30-40% roztwór skrobi jest aplikowany bezpośrednio na powierzchnię gorącego walca lub pary walców i suszony. Podgotowana i wysuszona skrobia jest zbierana z powierzchni walców za pomocą zgarniaków-skrobaków, po czym rozdrabniana do pożądanej granulacji (Thomas i Atwell, 1997; Yan i Zhengbiao, 2010).

Podczas suszenia rozpyłowego uzyskuje się kuliste cząstki modyfikatu skrobiowego poprzez rozpylenie roztworu lub zawiesiny skrobiowej w gorącym gazie. Metoda ta stosowana jest z powodzeniem do produkcji fizycznie modyfikowanej skrobi lub maltodekstryn (Adhikari i in., 2003; Yan i Zhengbiao, 2010).

Skrobia modyfikowana fizycznie za pomocą wysokiego ciśnienia charakteryzuje się obniżoną temperaturą kleikowania w porównaniu do skrobi natywnej (Błaszczak i in., 2005). Oddziaływanie wysokim ciśnieniem na skrobię powoduje zmiany w wewnętrznej, krystalicznej strukturze ziarenek skrobiowych prowadząc do powstania struktur amorficznych.

Na całym świecie rozwijane są nowe metody fizycznej modyfikacji skrobi, takie jak: zamrażanie (Szymońska i in., 2003), kontrolowane obniżenie ciśnienia - DIC (Zarguili i in., 2006), pulsacyjne pole elektryczne (Han i in., 2009), elektryczne wyładowanie koronowe (Nemtanu i Minea, 2006) i wiele innych (Kaur i in., 2012; Ashogbon i Akintayo, 2014).

Popularna technika ekstruzji w ostatnich latach jest coraz chętniej stosowana także w różnorodnych procesach modyfikacji skrobi. Ekstruzja surowców pochodzenia roślinnego to wytłaczanie materiału sypkiego pod dużym ciśnieniem i przy wysokiej temperaturze. Wywołuje to w nim istotne zmiany fizykochemiczne oraz jakościowe. Proces ten prowadzony jest w urządzeniach zwanych ekstruderami, których głównym organem roboczym jest ślimak lub para ślimaków umieszczonych w obudowie – cylindrze, przeciskających materiał przez specjalną matrycę instalowaną na jego końcu. W trakcie obróbki ciśnieniowo-termicznej, podczas której ciśnienie wytłaczania może dochodzić do 20 MPa, zaś temperatura gęstwy do 200°C, materiał jest mieszany, zagęszczany, ściskany, upłynniany i uplastyczniany w końcowej strefie aparatu. Zakres zmian fizycznych i chemicznych w obrabianych surowcach zależy w głównej mierze od przyjętych parametrów procesu ekstruzji oraz konstrukcji ekstrudera, czyli jego możliwości aplikacyjnych (Mościcki i in., 2007; Moraru i Kokini, 2003).

Ekstrudery są urządzeniami wielofunkcyjnymi i mogą służyć do wytwarzania różnego rodzaju produktów (Mercier i in., 1989; Mościcki i in., 2007). Technologia produkcji każdego rodzaju ekstrudatu wymaga odpowiedniego doboru parametrów procesu (rozkładu temperatur, ciśnienia i wilgotności materiału) w celu uzyskania odpowiedniej jakości wyrobów i kształtowania w szerokim zakresie pożądanych ich cech fizycznych i użytkowych (Camire i in., 1990; Guy, 2001; Harper, 1981; Jones i in., 2000; Singh i in., 2007; Quing i in., 2005; Wang i in., 2007; Barron i in., 2001; Harper, 1981; Mercier i in., 1989).

Proces ekstruzji może być z powodzeniem stosowany w trzech rodzajach modyfikacji skrobi:

1) **Modyfikacja ciśnieniowo-termiczna** (ekstruzja) skrobi (Wolf, 2010; Sharma i in., 2015). Obróbka ciśnieniowo-termiczna ułatwia skleikowanie skrobi, procesowi temu towarzyszy rozerwanie międzycząsteczkowych wiązań wodorowych, co powoduje znaczne zwiększenie chłonności wody i rozrywanie ziaren skrobiowych, prowadzące do zmian właściwości fizykochemicznych skrobi (Miladinov i Hanna, 2001; Nabeshima i Grossmann, 2001; Quing i in., 2005; Hagenimana i in., 2006; Mościcki i in., 2007).

2) **Ekstruzja reaktywna** (Xie i in., 2006). Ekstruder pełni rolę reaktora chemicznego, w którym można prowadzić modyfikację chemiczną skrobi np.,.: kopolimeryzację szczepioną, kationizację, utlenianie, itp.

3) **Produkcja skrobi termoplastycznej (TPS)** (Moscicki i Janssen, 2011). W celu uzyskania skrobi termoplastycznej (ang. *thermoplastic starch*) należy zniszczyć krystaliczną naturę ziarenek skrobi poprzez termiczne i mechaniczne przetworzenie z udziałem

plastyfikatora, takiego jak woda. Skrobia termoplastyczna uzyskana ze skrobi plastyfikowanej wyłącznie wodą staje się bardzo krucha w temperaturze pokojowej. W celu zwiększenia elastyczności materiału oraz poprawy przetwarzania stosuje się także inne plastyfikatory, takie jak: gliceryna, glikol propylenowy, glukoza, sorbitol i inne. Aby poprawić właściwości mechaniczne materiałów ze skrobi termoplastycznej stosuje się różne dodatki: emulgatory, celulozę, włókna roślinne, korę, kaolin, pektyny i inne (Oniszczyk i in., 2015; Stasiak i in., 2014).

4.3. CEL I ZAKRES OSIĄGNIĘCIA

Celem prowadzonych badań zaprezentowanych w **publikacjach nr O1 – nr O9** stanowiących osiągnięcie naukowe było:

- przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat zastosowania procesu ekstruzji do modyfikacji skrobi, (**O1**),
- określenie możliwości zastosowania ekstrudera TS-45 do ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi poprzez określenie wydajności i energochłonności procesu, (**O2, O3, O4, O5**),
- analiza wybranych właściwości fizycznych modyfikatów skrobiowych uzyskanych metodą ekstruzji, (**O4, O5, O6**),
- ocena wpływu parametrów ekstruzji na mikrostrukturę oraz właściwości pastowe skrobi ekstrudowanych, (**O6**),
- określenie możliwości zastosowania ekstrudera TS-45 do modyfikacji skrobi na cele opakowaniowe poprzez wytworzenie i ocenę wybranych właściwości skrobiowych pianek opakowaniowych, (**O7**),
- analiza lepkości wodnych roztworów skrobi ekstrudowanych w zróżnicowanych warunkach, (**O8**),
- określenie przydatności skrobi modyfikowanej metodą ekstruzji jako dodatku funkcyjnego w produkcji przekąsek ekstrudowanych, (**O9**).

4.4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Stosowana na szeroką skalę w przemyśle spożywczym i paszowym skrobia modyfikowana chemicznie traci swoją popularność. Związane jest to z kosztem jej produkcji,

jak też i opinią klientów, poszukujących wyrobów jak najmniej przetworzonych chemicznie. Zastąpić ją może skrobia modyfikowana metodami fizycznymi.

Rozwój przemysłu spożywczego i paszowego, powstawanie nowych produktów żywnościowych oraz prozdrowotne tendencje żywieniowe obserwowane w ostatnich latach, ponownie zwróciły uwagę naukowców i producentów na możliwość zastosowania techniki ekstruzji do ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi. Nie bez znaczenia są preferencje konsumentów poszukujących żywności wygodnej, łatwej do przygotowania, ale jednocześnie zdrowej i w jak najmniejszym stopniu przetworzonej chemicznie. Z uwagi na rozwój nowych technologii oraz wzrastające zapotrzebowanie na skrobię modyfikowaną, także inne gałęzie przemysłu zainteresowały się możliwością zastosowania w swoich produktach skrobi modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie. Modyfikacja skrobi metodą ekstruzji znalazła się także w kręgu zainteresowań producentów opakowań. Spowodowane jest to coraz większą świadomością ekologiczną społeczeństwa oraz popularnością materiałów biodegradowalnych. Możliwość wytwarzania skrobi termoplastycznej dzięki zastosowaniu procesu ekstruzji budzi duże zainteresowanie wśród naukowców i producentów opakowań.

Technika ekstruzji umożliwia w bardzo szerokim zakresie kształtowanie cech końcowego produktu. Zmiana konfiguracji ślimaków tłoczących, zastosowanie chłodzenia lub ogrzewania segmentów ekstrudera i zastosowanie matryc formujących o zróżnicowanych kształtach pozwala na zastosowanie jednego urządzenia do uzyskania szerokiego asortymentu wyrobów ekstrudowanych. Proces ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi może być prowadzony z zastosowaniem ekstruderów jedno- i dwuślimakowych.

Proces ekstruzji mąki lub skrobi przebiega przy zastosowaniu intensywnej obróbki termicznej w krótkim czasie przy udziale wysokiego ciśnienia i działających sił ścinających. Powoduje to, że granulki skrobi tracą swoją krystaliczną strukturę, dzięki czemu łatwiej wiążą zimną wodę i są strawne. Ekstruzja jest procesem HTST (ang. *High Temperature Short Time*) pozwalającym uniknąć powstawania reakcji Maillarda w przetwarzanym surowcu. Produkty ekstrudowane łączą w sobie dużą funkcjonalność z dobrymi właściwościami odżywczymi. Dzięki procesowi ekstruzji przetworzona skrobia może uzyskać właściwości, których nie posiadała, takie jak:

- zdolność do wiązania zimnej wody i tworzenia w niej zawiesin, co oznacza, że może rozpuszczać się w zimnej wodzie, zagęszczać mieszanki, posiada także zdolność wiązania tłuszczu;

- inaktywacja składników antyżywnościowych, takich jak inhibitory trypsyny (w skrobiach z roślin strączkowych), co czyni tak zmodyfikowaną skrobię idealnym dodatkiem do żywności i pasz;
- produkt bezpieczny mikrobiologicznie i o długim czasie przechowywania dzięki zniszczeniu mikroorganizmów;
- wysoki poziom czystości, ponieważ modyfikacja skrobi w ekstruderze przebiega bez udziału środków chemicznych.

Produkcja modyfikatów skrobiowych metodą ekstruzji może być z powodzeniem realizowana w małych i średnich przedsiębiorstwach, będąc doskonałym uzupełnieniem oferowanego przez nie asortymentu produktów ekstrudowanych.

W związku z tym, podjęto badania dotyczące możliwości zastosowania polskiego ekstrudera jednoślیمakowego TS-45 do ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi.

Na podstawie analizy literatury w pracy **O1** przedstawiono istniejący stan wiedzy na temat procesu ekstruzji, modyfikacji skrobi, przemian skrobi w czasie ekstruzji oraz możliwości zastosowania skrobi ekstrudowanych.

Ekstruzja surowców roślinnych może być traktowana jako jedna z metod formowania surowców. W praktyce jest to wytłaczanie materiału sypkiego pod dużym ciśnieniem i przy wysokiej temperaturze przez mały otwór lub otwory. Proces ten realizowany jest w urządzeniach nazywanym ekstruderami, których głównym organem roboczym jest ślimak lub para ślimaków umieszczona w cylindrze. Ślimak transportuje materiał i przeciska go przez specjalną matrycę zainstalowaną na końcu cylindra. Proces ekstruzji odbywa się przy udziale wysokiej temperatury i ciśnienia, co wywołuje w przetwarzanym materiale istotne zmiany fizyczne i chemiczne. Zawarta w surowcu woda sprawia, że w takich warunkach następuje tzw. „zagotowanie” gęstwy. Materiał po opuszczeniu otworu matrycy ekspanduje w wyniku gwałtownego odparowania wody. Otrzymany w rezultacie produkt ma budowę zbliżoną do plastra miodu, którą kształtować mogą ewentualnie także wiązki stopionych włókien białkowych.

Ekstrudery, jako urządzenia wielofunkcyjne, służą do produkcji różnego rodzaju produktów, jak np.: galanteria śniadaniowa, przekąski, słodczyce, makaron, analogi mięsa czy karma dla zwierząt domowych i ryb. W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój wykorzystania techniki ekstruzji do modyfikacji surowców skrobiowych w celu otrzymania tzw. komponentów funkcjonalnych dla przemysłu spożywczego, chemicznego czy papierniczego.

Właściwości skrobi modyfikowanej zależą od warunków jej otrzymania, jak i pochodzenia surowca. Na rynku można spotkać wiele rodzajów skrobi modyfikowanych uzyskiwanych metodami chemicznymi, enzymatycznymi lub fizycznymi.

Chemiczna modyfikacja skrobi polega na podstawieniu niewielkiej części grup hydroksylowych lub wytworzeniu w cząsteczce skrobi nowych grup funkcyjnych z zastosowaniem czynników utleniających. Podczas tego procesu jednocześnie zachodzi rozrywanie pierścieni piranozowych lub łańcucha polimerowego, co powoduje zmianę właściwości chemicznych i fizycznych skrobi. W metodach enzymatycznych modyfikacji skrobi wykorzystuje się zjawisko hydrolizy skrobi z zastosowaniem enzymów wytwarzanych przez drobnoustroje lub dodawanych do skrobi, najczęściej są to α - lub β -amylazy.

Najpopularniejszą metodą modyfikacji fizycznej skrobi jest obróbka termiczna. Podczas ogrzewania ulega zniszczeniu struktura ziaren skrobi i zachodzi proces kleikowania. Dochodzi do rozrywania wiązań wodorowych, stabilizujących trzecio- i czwartorzędową strukturę makrocząsteczek. Gdy z układu zostanie szybko usunięta woda, to pierwotna struktura skrobi nie zostaje odtworzona i otrzymuje się skrobię modyfikowaną. Najpopularniejsze metody otrzymywania skrobi modyfikowanych fizycznie to suszenie bębnowe i rozpyłowe. Obróbka termiczna może odbywać się także w systemie porcjowym w zamkniętych reaktorach, w których uwodniona do odpowiedniej wilgotności skrobia jest ogrzewana w temperaturze do 130°C przez określony czas (do 72 godzin). Na całym świecie rozwijane są nowe metody fizycznej modyfikacji skrobi, takie jak: działanie wysokiego ciśnienia, zamrażanie, kontrolowane obniżenie ciśnienia – DIC, pulsacyjne pole elektryczne, elektryczne wyładowanie koronowe, i inne.

W ostatnich latach obserwuje się wzmożone zainteresowanie możliwością zastosowania ekstruzji do produkcji skrobi modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie. Zainteresowanie to skupione jest jednak głównie na zastosowaniu do tego celu ekstruderów dwuślimakowych.

W warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia, w obecności sił ścinających skrobia ulega przemianom fizykochemicznym. Skrobia natywna, niezależnie od botanicznego źródła pochodzenia, charakteryzuje się regularną budową krystaliczną. Przy temperaturze charakterystycznej dla każdego rodzaju skrobi, zwanej temperaturą kleikowania, skrobia nieodwracalnie traci swój kształt regularnych ziarenek oraz właściwości (np. nierozpuszczalność w zimnej wodzie). Zmiany te powodują wzrost lepkości ogrzewanego roztworu i zwiększenie rozpuszczalności skrobi w wodzie.

Podczas obróbki ciśnieniowo-termicznej w ekstruderze skrobia w wyniku kleikowania zmienia strukturę z krystalicznej na amorficzną, tracąc przy tym charakterystyczną dwójłomność (Mościcki i in., 2007; Thomas i Atwell, 1997; Barron i in., 2001; Cheyne i in., 2005; van den Einde i in., 2003). Materiał podlega postępującemu ściskaniu i transformacji w gęstą, zwartą i jednolitą masę, w której pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia zanika krystaliczna struktura ziarenek skrobi. Woda lub inne plastyfikatory (np. gliceryna) obniżają temperaturę topienia skrobi, ułatwiając tym samym jej przemiany fizykochemiczne. Stopień zachodzących zmian w skrobi zależy od odpowiednio dobranych parametrów procesu oraz czasu przebywania surowców w ekstruderze, dzięki czemu można wpływać na cechy uzyskanych modyfikatów. W ten sposób można kontrolować stopień skleikowania skrobi, jej strukturę, współczynnik ekspandowania, wodochłonność, rozpuszczalność w zimnej wodzie, właściwości pastowe (ang. *pasting properties*), czy lepkość wodnych zawiesin modyfikatów skrobiowych.

Skrobie modyfikowane metodą ekstruzji mogą być stosowane jako dodatki funkcjonalne w przemyśle piekarniczym, mięsnym, w produkcji pelletów i przekąsek, galanterii śniadaniowej, odżywek dla dzieci, produkcji koncentratów zup, sosów, dressingów, deserów, makaronów, preparatów mlekozastępczych dla zwierząt oraz w wielu innych produktach.

Analiza literatury przeprowadzona na potrzeby publikacji **O1** posłużyła także do wybrania zmiennych parametrów procesu ekstruzji, mających wpływ na przebieg procesu modyfikacji skrobi, wykorzystywanych w badaniach doświadczalnych. Do prac doświadczalnych wykorzystano polski ekstruder TS-45 o stosunku L/D=16. Oceniano wpływ następujących parametrów na wyniki procesu ekstruzji skrobi:

- rodzaj skrobi, w badaniach stosowano popularną skrobię pszenną, kukurydzianą i ziemniaczaną dostępną na lokalnym rynku;
- wilgotność skrobi, w badaniach stosowano 4 poziomy wilgotności skrobi: 17, 20, 25 i 30%;
- prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera, w badaniach stosowano 4 poziomy prędkości: 60, 80, 100 i 120 obr·min⁻¹;
- temperatura ekstruzji, w badaniach stosowano 3 temperatury procesu: 100, 120, 140°C.

Na podstawie danych literaturowych określono także zakres badań właściwości fizykochemicznych uzyskiwanych skrobi modyfikowanych ciśnieniowo-termicznie. W trakcie badań oceniano: stopień skleikowania skrobi, współczynnik ekspandowania, wodochłonność (WAI – ang. *water absorption index*), rozpuszczalność w zimnej wodzie

(WSI – ang. *water solubility index*), właściwości pastowe, lepkość wodnych roztworów, mikrostrukturę ekstrudatów skrobiowych.

Bardzo istotnym aspektem, związanym z wytwarzaniem modyfikatów skrobiowych, była ocena wydajności i energochłonności procesu ekstruzji. Zaprezentowano je w pracach **O2** (dla skrobi ziemniaczanej) oraz **O3** (dla skrobi kukurydzianej). Dodatkowo, w pracach **O4** i **O5** przedstawiono wyniki pomiaru energochłonności procesu ekstruzji skrobi ziemniaczanej oraz pszennej.

Badania obejmowały:

- określenie wpływu zmiennych parametrów procesu ekstruzji skrobi na wydajność ekstrudera,
- określenie wpływu zmiennych parametrów procesu ekstruzji na energochłonność modyfikacji skrobi poprzez określenie współczynnika jednostkowego zużycia energii mechanicznej (SME).

Ekstruder TS-45 może być z powodzeniem zastosowany do przetwarzania skrobi różnego pochodzenia. Proces ekstruzji skrobi charakteryzował się zróżnicowaną wydajnością, która kształtowała się w zakresie 11,3-28,0 kg·h⁻¹ dla skrobi ziemniaczanej oraz 10,8-26,6 kg·h⁻¹ dla skrobi kukurydzianej. W przypadku wszystkich testowanych skrobi badania wykazały, że niezależnie od zastosowanej temperatury przetwarzania oraz wilgotności surowca, zwiększenie prędkości ślimaka miało pozytywny wpływ na zwiększenie wydajności ekstruzji skrobi.

W trakcie modyfikacji skrobi ziemniaczanej (**O2**) w temperaturze 100°C stwierdzono początkowe obniżenie, a następnie wzrost wydajności procesu ekstruzji, wraz ze wzrostem wilgotności skrobi. W temperaturze 120 i 140°C zaobserwowano obniżenie wydajności procesu ekstruzji skrobi ziemniaczanej wraz ze wzrostem jej wilgotności. Generalnie można stwierdzić, że największą wydajność procesu ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi obserwowano przy zastosowaniu temperatury przetwarzania 100°C. Proces prowadzony w wyższych temperaturach charakteryzował się mniejszą wydajnością.

W przypadku modyfikacji skrobi kukurydzianej metodą ekstruzji (**O3**) stwierdzono, że wyższa wilgotność skrobi gwarantowała większą wydajność procesu. Zmiana temperatury procesu ekstruzji nie wpływała istotnie na zmiany wydajności procesu ekstruzji skrobi kukurydzianej.

Energochłonność procesu jest bardzo ważnym czynnikiem określającym opłacalność jego prowadzenia. Jedną z metod pomiaru energochłonności jest pomiar współczynnika jednostkowego zużycia energii mechanicznej (SME). Pomiar prowadzony w trakcie ekstruzji

skrobi ziemniaczanej, kukurydzianej i pszennej wykazały, że jednostkowe zużycie energii mechanicznej zależy głównie od wilgotności skrobi i prędkości ślimaka ekstrudera. Temperatura procesu ekstruzji miała mało istotny wpływ na zmiany wartości SME. Niezależnie od zastosowanego rodzaju skrobi, zaobserwowano większą energochłonność procesu ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi w przypadku zastosowania większej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera.

Wpływ wilgotności skrobi na energochłonność ekstruzji był niejednoznaczny. Podczas przetwarzania skrobi ziemniaczanej (**O2** i **O4**) w temperaturze 100°C obserwowano obniżenie wartości SME w trakcie ekstruzji skrobi o większej wilgotności. Proces prowadzony w wyższych temperaturach charakteryzował się większą energochłonnością, dla surowców o większej wilgotności.

W przypadku ekstruzji skrobi kukurydzianej (**O3**) prowadzonej w temperaturze 100°C stwierdzono, że zwiększenie wilgotności przetwarzanego surowca prowadzi do obniżenia energochłonności procesu. W trakcie prowadzenia procesu modyfikacji skrobi kukurydzianej w wyższych temperaturach stwierdzono brak wpływu wilgotności na energochłonność procesu prowadzonego z prędkością ślimaka 60-80 obr·min⁻¹. Jednak w trakcie modyfikacji prowadzonej z prędkością ślimaka 100-120 obr·min⁻¹ obserwowano wzrost wartości SME wraz ze wzrostem wilgotności skrobi poddawanej modyfikacji.

Podczas modyfikacji skrobi pszennej (**O5**) prowadzonej w temperaturze 100 i 120°C stwierdzono, że wyższa wilgotność surowca skutkowała większą energochłonnością procesu. W trakcie ekstruzji w temperaturze 140°C obserwowano obniżenie wartości SME wraz ze wzrostem wilgotności skrobi pszennej.

Ogólnie można stwierdzić, że proces modyfikacji skrobi metodą ekstruzji charakteryzował się stosunkowo niską energochłonnością. Wartości SME kształtowały się w granicach 0,08-0,27 kWh·kg⁻¹ (288-972 kJ·kg⁻¹) dla skrobi ziemniaczanej, 0,07-0,30 kWh·kg⁻¹ (270-1069 kJ·kg⁻¹) dla skrobi pszennej oraz 0,08-0,29 kWh·kg⁻¹ (288-1044 kJ·kg⁻¹) dla skrobi kukurydzianej. Są to wyniki porównywalne z rezultatami uzyskiwanymi przez innych badaczy. Bindzus i in. (2002) stwierdzili, że podczas przetwarzania skrobi pszennej, kukurydzianej i ryżowej w ekstruderze dwuślimakowym wartości SME zmieniają się w zakresie 0,081–0,365 kWh·kg⁻¹. Wiedmann i Strobel (1991) podczas badań ekstruzji pszennej skrobi termoplastycznej zarejestrowali zmiany SME w granicach od 0,10 do 0,55 kWh·kg⁻¹ w zależności od wilgotności surowca.

Wyniki badań energochłonności przedstawione w pracach **O2**, **O3**, **O4** i **O5** wskazują na możliwość zastosowania ekstrudera TS-45 w tego typu procesie, co może być bardzo użyteczne dla małych i średnich przedsiębiorstw, z uwagi na stosunkowo niski koszt tego urządzenia oraz niską energochłonność modyfikacji skrobi tą metodą. Umożliwiają one także dobór odpowiednich parametrów procesu modyfikacji termicznej skrobi metodą ekstruzji w zależności od rodzaju stosowanego surowca.

W pracy **O4** przedstawiono wpływ parametrów ekstruzji na zmiany wybranych właściwości fizycznych skrobi ziemniaczanej. Ocena tych zmian umożliwia dostosowanie parametrów procesu modyfikacji skrobi w zależności od późniejszego przeznaczenia modyfikatu.

Badania obejmowały:

- ocenę współczynnika ekspandowania w zależności od zastosowanych parametrów procesu ekstruzji,
- ocenę wpływu parametrów procesu modyfikacji na wodochłonność (WAI) ziemniaczanej skrobi modyfikowanej,
- ocenę wpływu parametrów procesu modyfikacji na współczynnik rozpuszczalności w zimnej wodzie (WSI) ziemniaczanej skrobi modyfikowanej,
- pomiar energochłonności procesu ekstruzji (przedstawiony we wcześniejszej sekcji tego załącznika dotyczącej energochłonności procesu ekstruzji).

Według Ryu and Ng (2001) wilgotność surowca wpływa na reologiczne właściwości upłynnionej masy (gęstwy) i wzrost ciśnienia pary wodnej wewnątrz urządzenia. W rezultacie powoduje to gwałtowne odparowanie wody, gdy upłynniona masa opuszcza matrycę ekstrudera. Natomiast lepkość gęstwy wpływa na powstawanie pęcherzyków pary wodnej, jak również na kurczenie się już uformowanych pęcherzyków. Surowiec o dużej wilgotności formuje gęstwę o małej lepkości, w wyniku czego zwiększa się ilość kurczących się i zapadających pęcherzyków podczas odparowania na wyjściu z ekstrudera. Lepkość oraz temperatura przejścia szklistego gęstwy podczas powstawania pęcherzyków pary wodnej wewnątrz ekstrudatów wpływają na ich zapadanie się. W gęstwie o dużej wilgotności następuje większe zapadanie się pęcherzyków podczas ich formowania, ponieważ gęstwa o dużej wilgotności lub małej lepkości posiada niską temperaturę przejścia szklistego. Z tego powodu, podczas ekstruzji, obserwuje się spadek ekspandowania wraz ze wzrostem wilgotności surowców (Moraru i Kokini, 2003).

Pomiary współczynnika ekspandowania skrobi ziemniaczanej wykazały, że jego wartość obniża się wraz ze wzrostem wilgotności surowca, a zwiększa wraz ze wzrostem

prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera. Jest to typowe zachowanie dla większości ekstrudatów. Uzyskane ekstrudaty charakteryzowały się typową strukturą przypominającą strukturę plastra miodu. Przy wysokich wilgotnościach surowca (25 i 30%) obserwowano powstawanie „szklistych” ekstrudatów o niewielkim współczynniku ekspandowania. Efekt ten był szczególnie widoczny przy zastosowaniu temperatury ekstruzji 120 i 140°C. Uzyskiwane w tych warunkach ekstrudaty miały jednorodną, amorficzną strukturę, bez porów i pęcherzy. Zmiany współczynnika ekspandowania ekstrudowanej skrobi ziemniaczanej zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla innych typów skrobi w publikacji **O6**.

W trakcie badań stwierdzono, że wartość WAI początkowo zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości ślimaka, po czym obniżała przy dużych prędkościach ślimaka. Wraz ze wzrostem wilgotności przetwarzanej skrobi ziemniaczanej obserwowano wzrost wartości wodochłonności ekstrudatów. Najwyższe wartości wodochłonności obserwowano w skrobi ekstrudowanej w 100°C, zaś najniższe w skrobi przetwarzanej w temperaturze 120°C. Wzrost temperatury ekstruzji do 140°C powodował ponowny wzrost wartości WAI. Wodochłonność ziemniaczanej skrobi natywnej wynosiła około 97%. Wartości WAI ekstrudowanej skrobi ziemniaczanej wynosiły od 282 do 569% i ogólnie nie odbiegały od wartości uzyskiwanych w trakcie pomiarów typowych ekstrudatów skrobiowych (Mercier i in., 1989). Analiza wariancji tego parametru, w zależności od wilgotności surowca i obrotów ślimaka, wykazała istotne różnice statystyczne przy poziomie istotności 0,05. Jedynie w ekstrudatach uzyskanych w temperaturze 140°C nie stwierdzono istotnych różnic statystycznych w zależności pomiędzy wodochłonnością a obrotami ślimaka.

W trakcie badań stwierdzono, że wartość współczynnika WSI zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka i obniżała się wraz ze wzrostem wilgotności przetwarzanego surowca. Wartość WSI ziemniaczanej skrobi natywnej wynosiła około 0,25%. Najwyższe wartości rozpuszczalności (40%) uzyskano w odniesieniu do skrobi modyfikowanej w temperaturze 120°C. W miarę wzrostu temperatury procesu ekstruzji, obserwowano początkowy wzrost WSI, po czym następował jego spadek. Analiza wariancji WSI, w zależności od wilgotności surowca i obrotów ślimaka, wykazała istotne różnice statystyczne przy poziomie istotności 0,05.

Badania wykazały, że dzięki procesowi ekstruzji można z powodzeniem kreować właściwości fizyczne skrobi ziemniaczanej modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie. Zmiany rozpuszczalności skrobi związane były, podobnie jak w przypadku zmian WAI, ze zmianami w procesie kleikowania i degradacji skrobi oraz obniżeniem temperatury przejścia szklistego, wywołanej wzrostem wilgotności surowca. Dzięki tym badaniom możliwe jest dobranie

odpowiednich parametrów modyfikacji skrobi ziemniaczanej metodą ekstruzji z zastosowaniem ekstrudera jednoślimakowego TS-45. Umożliwiają one małym i średnim przedsiębiorstwom podjęcie produkcji takich modyfikatów skrobiowych przy stosunkowo niskich nakładach finansowych.

W pracy **O5** przedstawiono wpływ parametrów ekstruzji na zmiany wybranych właściwości fizycznych skrobi pszennej. Ocena tych zmian umożliwia dostosowanie parametrów procesu modyfikacji skrobi w zależności od późniejszego przeznaczenia uzyskiwanych produktów.

Badania obejmowały:

- pomiar energochłonności procesu ekstruzji (przedstawiony we wcześniejszej sekcji tego załącznika dotyczącej energochłonności procesu ekstruzji),
- pomiar stopnia skleikowania skrobi w zależności od parametrów procesu ekstruzji,
- ocenę współczynnika ekspandowania w zależności od zastosowanych parametrów procesu ekstruzji,
- ocenę wpływu parametrów procesu modyfikacji na wodochłonność (WAI) pszennej skrobi modyfikowanej,
- ocenę wpływu parametrów procesu modyfikacji na współczynnik rozpuszczalności w zimnej wodzie (WSI) pszennej skrobi modyfikowanej.

Najwyższy stopień skleikowania (100%) stwierdzono w przypadku skrobi o wilgotności początkowej 17%, ekstrudowanej w temperaturze 100°C. Najniższą wartość stopnia skleikowania (69,8%) zaobserwowano podczas ekstruzji skrobi o wilgotności 30% w temperaturze 120°C. W trakcie badań stwierdzono, że niezależnie od zastosowanych parametrów procesu ekstruzji większa wilgotność skrobi powodowała obniżenie wartości stopnia skleikowania. Badania wykazały, że stopień skleikowania zwiększa się rośnie wraz ze wzrostem prędkości ślimaka ekstrudera podczas ekstruzji skrobi pszennej w temperaturze 100 i 140°C. Podczas procesu ekstruzji w temperaturze 120°C wyższe obroty ślimaka powodowały obniżenie stopnia skleikowania skrobi.

Pomiary współczynnika ekspandowania ekstrudowanej skrobi pszennej wykazały, że jego wartość obniżała się wraz ze wzrostem wilgotności skrobi. Wzrost prędkości obrotowej ślimaka powodował zwiększenie współczynnika ekspandowania. Są to zjawiska typowe dla ekstrudatów. Ekstrudaty pszenne charakteryzowały się typową strukturą przypominającą strukturę plastra miodu. Zmiany współczynnika ekspandowania ekstrudowanej skrobi pszennej zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla innych typów skrobi w publikacji **O6**.

Wraz ze wzrostem wilgotności przetwarzanej skrobi pszennej obserwowano obniżenie współczynnika absorpcji wody. Wyższe obroty ślimaka powodowały obniżenie WAI skrobi ekstrudowanej w temperaturze 100 i 120°C. Badania przeprowadzone w temperaturze 140°C wykazały, że większa prędkość ślimaka powodowała początkowe zwiększenie (60-80 obr·min⁻¹) a następnie obniżenie (100-120 obr·min⁻¹) współczynnika absorpcji wody dla modyfikowanej skrobi. Natywna skrobia pszenna charakteryzowała się wodochłonnością na poziomie 184%. WAI ekstrudowanej skrobi pszennej osiągały wartości od 369 do 690%.

Badania wykazały, że większa wilgotność surowca powodowała obniżenie wartości WSI ekstrudatów skrobiowych. Donoszono wcześniej o podobnym, negatywnym wpływie wilgotności na WSI w przypadku skrobi, kaszki kukurydzianej oraz mąki pszennej (Singh i Smith, 1997). Podczas badań zaobserwowano początkowo zwiększenie (60-80 obr·min⁻¹) a później obniżenie (100-120 obr·min⁻¹) rozpuszczalności skrobi modyfikowanej wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera. Wartości WSI wahały się w granicach od 3,8 do 19,0%. Zmiany rozpuszczalności skrobi były związane ze zmianami w procesie kleikowania i degradacji skrobi w wyniku wzrostu jej wilgotności. Przy małej i średniej wilgotności oraz wysokiej temperaturze woda w skrobi może zachowywać się jako środek smarny. Degradacja skrobi zwiększa się podczas stosowania większych prędkości ślimaka podczas przetwarzania surowca o małej wilgotności, ponieważ dostępna jest mniejsza ilość smaru (wody).

Badania wykazały, że z powodzeniem można kreować właściwości fizyczne skrobi pszennej poprzez jej modyfikację fizyczną metodą ekstruzji. Badania te dostarczają nowej wiedzy na temat doboru odpowiednich parametrów modyfikacji skrobi pszennej metodą ekstruzji z zastosowaniem ekstrudera jednoślindakowego TS-45 w celu uzyskania produktów o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych. Umożliwią one małym i średnim przedsiębiorstwom poszerzenie asortymentu produkowanych wyrobów ekstrudowanych o nową, często poszukiwaną, gamę produktów ekstrudowanych.

Zmiany współczynnika ekspandowania skrobi ekstrudowanej związane są ze zmianami mikrostruktury ekstrudatów. W pracy **O6** porównano zmiany współczynnika ekspandowania, mikrostruktury oraz właściwości pastowych skrobi pszennej, kukurydzianej i ziemniaczanej modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie.

Badania obejmowały:

- ocenę współczynnika ekspandowania modyfikatorów skrobiowych w zależności od zastosowanych parametrów procesu ekstruzji,

- ocenę mikrostruktury ekstrudatów skrobiowych, przeprowadzoną za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego oraz konfokalnego mikroskopu laserowego,
- badanie wpływu parametrów procesu ekstruzji na właściwości pastowe wodnych kleików skrobi ekstrudowanej.

Na współczynnik ekspandowania miały wpływ zarówno rodzaj zastosowanej w modyfikacji skrobi, jak również i parametry procesu modyfikacji. Generalnie można stwierdzić, że zależność współczynnika ekspandowania od rodzaju skrobi można uszeregować w następujący sposób: skrobia pszenna > skrobia ziemniaczana > skrobia kukurydziana.

Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ wilgotności skrobi oraz prędkości ślimaka ekstrudera na proces ekspandowania skrobi. Większa prędkość ślimaka powodowała większe ekspandowanie ekstrudowanej skrobi. Generalnie można stwierdzić, że większa wilgotność ekstrudowanego surowca miała negatywny wpływ na współczynnik ekspandowania modyfikatów skrobiowych. Zastosowanie wyższej temperatury podczas ekstruzji skrobi pszennej powodowało intensywniejsze ekspandowanie ekstrudatów. W przypadku ekstruzji skrobi ziemniaczanej i kukurydzianej obserwowano obniżenie współczynnika ekspandowania przy podwyższeniu temperatury procesu ze 100°C do 120°C. Zastosowanie temperatury 140°C spowodowało wzrost współczynnika ekspandowania modyfikatów skrobiowych.

Analiza mikroskopowa wykazała, że uzyskane ekstrudaty pszenne charakteryzowały się porowatą strukturą, przypominającą strukturę plastra miodu. Obserwowano obecność dużych porów (pustych przestrzeni), o cienkich ściankach, będących pozostałością po fazie ekspandowania ekstrudatu i odparowania wody. Ścianki porów zbudowane były z upłynnionych polimerów skrobiowych o charakterystycznej, włóknistej strukturze. Zastosowanie większych prędkości obrotowych ślimaka ekstrudera powodowało powstawanie ekstrudatów z większymi porami. Zastosowanie w procesie ciśnieniowo-termicznej modyfikacji surowca o wyższej wilgotności powodowało powstawanie produktu posiadającego mniejszą ilość porów. Następowo także zmniejszenie rozmiarów porów oraz zwiększenie grubości ich ścian. Podobną strukturę obserwowano w przypadku ekstrudatów ziemniaczanych i kukurydzianych, wyprodukowanych w temperaturach 100 i 120°C. Włókna polimerowe, z których uformowały się ściany porów, ulegały powolnemu topieniu i wzajemnemu łączeniu wraz ze wzrostem ilości wody w modyfikowanym materiale. Podwyższenie temperatury ekstruzji do 140°C przyspieszyło to zjawisko, prowadząc do powstania jednorodnej, amorficznej struktury w całej objętości ekstrudatu. Struktura ta była

w szczególności obserwowana w trakcie modyfikacji skrobi kukurydzianej i ziemniaczanej o wilgotności 25-30% w temperaturze 140°C.

Pomiary właściwości pastowych modyfikatorów skrobiowych są pośrednim wskaźnikiem zakresu zmian zachodzących w skrobi podczas jej ekstruzji. W badaniach określano lepkość zimnego kleiku (cpv) – największą lepkość kleiku podczas ogrzewania i lepkość gorącego kleiku (hvp) – lepkość po ochłodzeniu kleiku do temperatury 50°C.

Skrobie natywne nie wykazują wartości cpv, ponieważ chłoną w bardzo małym stopniu wodę w temperaturze niższej niż temperatura kleikowania skrobi. Badania wykazały, że prędkość ślimaka ekstrudera nie miała istotnego wpływu na lepkość zimnego kleiku. Zaobserwowano pozytywny wpływ wzrostu wilgotności modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie skrobi na lepkość zimnego kleiku uzyskiwanych modyfikatorów. Zastosowanie większej temperatury ekstruzji prowadziło do uzyskiwania kleików skrobi pszennej i kukurydzianej charakteryzujących się większą wartością cpv. W przypadku skrobi ziemniaczanej, wyższa temperatura ekstruzji prowadziła do tworzenia kleików o mniejszej wartości cpv. Badania wykazały, że kleiki uzyskane z modyfikatorów ekstrudowanych w wyższej temperaturze charakteryzowały się mniejszą wartością hvp. Lepkość gorącego kleiku była większa w przypadku skrobi ekstrudowanych przy wyższych wilgotnościach surowca. Prędkość ślimaka ekstrudera miała niewielki i niejednoznaczny wpływ na zmiany lepkości gorącego kleiku.

Przedstawione w pracy pomiary współczynnika ekspandowania skrobi ekstrudowanych pozwalają na dobór parametrów procesu ekstruzji w celu uzyskania produktu o wymaganym współczynniku ekspandowania. Jest to szczególnie istotne w przypadku produkcji nowoczesnych, biodegradowalnych pianek opakowaniowych uzyskiwanych ze skrobi. Dodatkowo, dzięki procesowi ekstruzji, można kreować właściwości fizykochemiczne i strukturalne uzyskiwanych modyfikatorów, wpływając tym samym na właściwości uzyskiwanych z nich kleików skrobiowych. Wyniki tych badań umożliwią producentom zrozumienie zmian zachodzących w skrobi podczas jej ekstruzji z zastosowaniem ekstrudera TS-45. Pozwoli to małym i średnim przedsiębiorstwom na poszerzenie ich asortymentu produktów o szeroką gamę modyfikatorów skrobiowych do różnorodnych zastosowań (skrobiowe pianki opakowaniowe, dodatki funkcjonalne do żywności, komponenty klejów, itp.).

Jednym ze sposobów modyfikacji skrobi może być produkcja skrobi termoplastycznej (TPS z ang. *thermoplastic starch*) na cele opakowaniowe. Dzięki swojej uniwersalności, ekstruder TS-45 daje możliwość uzyskiwania półproduktów w postaci granulatu lub

gotowego produktu w postaci pianek opakowaniowych. W pracy **O7** zaprezentowano wyniki wstępnych badań dotyczących zastosowania procesu ekstruzji do produkcji pianek opakowaniowych ze skrobi termoplastycznej z dodatkiem substancji pomocniczych.

Badania obejmowały:

- badanie energochłonności procesu ekstruzji skrobi termoplastycznej poprzez pomiar współczynnika jednostkowego zużycia energii mechanicznej (SME).
- określenie temperatury przejścia szklistego TPS z wykorzystaniem skaningowej kalorymetrii różnicowej,
- ocena współczynnika ekspandowania pianek ze skrobi termoplastycznej,
- pomiar gęstości pianek,
- badanie wodochłonności i rozpuszczalności w wodzie pianek skrobiowych,
- badanie właściwości mechanicznych pianek skrobiowych.

Badania wykazały możliwość zastosowania ekstrudera TS-45 do produkcji pianek opakowaniowych ze skrobi termoplastycznej o zadawalających parametrach użytkowych. W trakcie badań stwierdzono, że ekstruzja skrobi termoplastycznej charakteryzowała się stosunkowo niską energochłonnością w granicach ok. $0,07 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Energochłonność procesu malała wraz ze wzrostem udziału procentowego plastyfikatora w mieszance surowcowej.

W trakcie badań stwierdzono, że temperatura przejścia szklistego skrobi termoplastycznej niemal liniowo zależy od ilości plastyfikatora. Wraz ze wzrostem udziału procentowego gliceryny obserwowano obniżanie wartości temperatury przejścia szklistego uzyskiwanej skrobi termoplastycznej.

Czynnikami wpływającymi na ekspandowanie pianek oraz ich strukturę są parametry procesu ekstruzji oraz skład surowcowy mieszanek. W szczególności współczynnik ekspandowania i struktura pianek skrobiowych były zależne od środka spieniającego (PLASTRONFOAM PDE) oraz od obecności wypełniacza w postaci talku. Talk będąc ośrodkiem powstawania pęcherzyków pary, ograniczał ekspandowanie poprzez zmniejszenie rozmiarów powstających pęcherzyków. Jednocześnie, struktura pianek ulegała ujednoczeniu dzięki powstawaniu dużej liczby małych pęcherzyków pary wodnej. Gęstość pianek skrobiowych wahała się w granicach $18,7\text{-}30,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Obecność pęcherzy ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne pianek. Pianki o większej gęstości mają pęcherzyki o grubszych ścianach i z tego powodu mogą być odporniejsze na ściskanie niż pianki o mniejszej gęstości z dużymi pęcherzami o cienkich

ściankach. Pianki uzyskane ze skrobi kukurydzianej i ziemniaczanej charakteryzowały się ściśliwością podobną do tej obserwowanej dla pianek z tworzyw sztucznych.

Badania wykazały korzystny wpływ plastyfikatora w postaci gliceryny na ograniczenie wodochłonności pianek ze skrobi termoplastycznej.

Badania wykazały, że zastosowanie ekstrudera TS-45 umożliwia produkcję nowoczesnych, biodegradowalnych pianek opakowaniowych ze skrobi termoplastycznej o zadowalających właściwościach mechanicznych. Dzięki odpowiedniemu doborowi składu surowcowego oraz zastosowanym parametrom procesu można uzyskać pianki o właściwościach użytkowych zbliżonych do parametrów pianek z tworzyw sztucznych. Zastosowanie ekstrudera TS-45 może umożliwić małym i średnim przedsiębiorstwom produkcję biodegradowalnych materiałów opakowaniowych oraz zwiększenie ich konkurencyjności na rynku.

Zastosowanie ekstruzji w modyfikacji skrobi pozwala zwiększyć jej rozpuszczalność w zimnej wodzie. Dzięki temu możliwa jest produkcja kleików skrobiowych i innych produktów rozpuszczalnych w zimnej wodzie. W pracy **O8** przedstawiono wpływ procesu ekstruzji na właściwości reologiczne wodnych zawiesin skrobiowych.

Badania obejmowały:

- pomiar lepkości zawiesin skrobi ekstrudowanej w zróżnicowanych warunkach, formowanych w zimnej wodzie. Badania prowadzone były na urządzeniu wytrzymałościowym Zwick z wykorzystaniem komory do ekstruzji wstecznej.

Skrobie natywne formują niestabilne zawiesiny w zimnej wodzie, ulegające szybkiej sedymentacji. Lepkość takich zawiesin była trudna do zmierzenia i jej wartość wynosiła ok. 3 mPa·s. Ekstrudowane skrobie zbożowe tworzyły nieprzezroczyste zawiesiny, podczas gdy ziemniaczana skrobia ekstrudowana formowała zawiesiny przezroczyste.

Parametry procesu ekstruzji miały znaczący wpływ na lepkość wodnych zawiesin skrobi ekstrudowanych. Największe znaczenie miała początkowa wilgotność skrobi przed procesem ekstruzji. Prędkość ślimaka ekstrudera i temperatura procesu ekstruzji miały mniejsze znaczenie.

Zawiesiny o większej lepkości formowały ekstrudaty ziemniaczane i kukurydziane uzyskane ze skrobi o wyższej wilgotności. W przypadku skrobi pszennej obserwowano negatywny efekt wzrostu wilgotności ekstrudowanego surowca na lepkość zawiesin z ekstrudowanej skrobi. Badania wykazały, że skrobia pszenna modyfikowana przy większej prędkości ślimaka tworzy wodne zawiesiny o większej lepkości. Negatywny efekt prędkości ślimaka ekstrudera w czasie modyfikacji skrobi na lepkość wodnych zawiesin odnotowano

w przypadku skrobi ziemniaczanej. W przypadku skrobi kukurydzianej efekt ten był niejednoznaczny. Wpływ temperatury ekstruzji na lepkość zawiesin skrobi ekstrudowanych był niejednoznaczny. Jedynie w przypadku skrobi pszennej stwierdzono, że ekstrudaty uzyskane w wyższej temperaturze formują zawiesiny o większej lepkości.

Badania wykazały, że parametry ekstruzji miały wpływ na lepkość wodnych zawiesin skrobi ekstrudowanych. Ekstrudowana skrobia pszenna tworzyła zawiesiny o największych lepkościach w granicach 1419-3441 mPa·s. Ekstrudowana skrobia kukurydziana tworzyła zawiesiny o stosunkowo średniej lepkości w granicach 481-3347 mPa·s. Zawiesiny o najmniejszej lepkości (338-2504 mPa·s) formowały ekstrudowane skrobie ziemniaczane.

Dzięki procesowi ekstruzji możliwe jest kreowanie właściwości fizykochemicznych i strukturalnych nowoczesnych kleików skrobiowych. Wyniki tych badań umożliwiają małym i średnim przedsiębiorstwom na zastosowanie ekstrudera TS-45 w celu produkcji szerokiej gamy produktów ekstrudowanych przeznaczonych na cele spożywcze (np. jako dodatki do żywności) oraz dla przemysłu chemicznego (np. do produkcji kleju).

Modyfikaty skrobiowe uzyskane metodą ekstruzji mogą być stosowane jako dodatki do żywności w przemyśle spożywczym. W pracy **O9** przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku skrobi modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie na wybrane właściwości fizyczne, parametry tekstury i cechy sensoryczne produktów przekąskowych. W badaniach wykorzystano dodatek ekstrudowanych skrobi kukurydzianej i ziemniaczanej w ilości 0-15% podczas produkcji chrupiek kukurydzianych i prażynek ziemniaczanych.

Badania obejmowały:

- ocenę współczynnika ekspandowania chrupiek i prażynek,
- ocenę gęstości w stanie usypowym produktów z dodatkiem modyfikatorów,
- badanie wybranych cech tekstury w teście cięcia nożem Warner-Bratzlera oraz podwójnego ściskania w komorze Kramera,
- ocenę wybranych cech sensorycznych przekąsek.

Współczynnik ekspandowania, jako jedna z najważniejszych cech produktów przekąskowych, jest istotnym wyróżnikiem zarówno dla producentów, jak i konsumentów. Przy wytwarzaniu przekąsek, zwłaszcza ekstrudowanych, lub smażonych prażynek, im większe będzie ekspandowanie wyrobów, tym więcej będzie pustych przestrzeni (porów) wewnątrz produktu, które warunkują odpowiednią konsystencję i chrupkość przekąsek. W badaniach stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem ilości skrobi modyfikowanej w

recepturach surowcowych współczynnik ekspandowania chrupek oraz prażynek smażonych ulegał zwiększeniu.

Parametrem bezpośrednio związanym z ekspandowaniem i przestrzenną strukturą produktów jest gęstość w stanie usypowym. Gęstość badanych produktów obniżała się wraz ze zwiększaniem dodatku skrobi modyfikowanych do receptur surowcowych przekąsek. Gęstość usypowa chrupek kukurydzianych bez dodatku skrobi wynosiła $108 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i obniżała się do wartości $94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ przy 15%-owym dodatku skrobi kukurydzanej obrabianej ciśnieniowo-termicznie. Gęstość usypowa prażynek ziemniaczanych obniżała się istotnie z $76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ podczas badania prażynek z taką samą ilością dodatku modyfikowanej skrobi ziemniaczanej.

Badania wybranych cech tekstury, przeprowadzone w teście cięcia i teście podwójnego ściskania, wykazały podwyższenie siły cięcia oraz twardości przekąsek przy zwiększającym się udziale skrobi modyfikowanych ciśnieniowo-termicznie w recepturze. Zwiększająca się twardość wyrobów miała również zdecydowany wpływ na obniżenie ocen podczas testów sensorycznych, zwłaszcza kruchości przekąsek. Dodatek skrobi w ilości większej niż 5% znacznie ograniczał atrakcyjność wyrobów ze względu na ich mniejszą kruchość oraz ciemniejszą barwę. Jednocześnie, zastosowanie tego dodatku miało pozytywny wpływ na odporność na uszkodzenia wyrobów podczas transportu.

Badania wykazały, że z powodzeniem można stosować skrobie modyfikowane metodą ekstruzji jako dodatek funkcjonalnych w produkcji przekąsek. Skrobie ekstrudowane są bezpieczną alternatywą dla skrobi modyfikowanych chemicznie lub innych chemicznych dodatków do żywności (np. emulgatory czy stabilizatory). Mogą je zastąpić w szerokiej gamie produktów spożywczych bez negatywnych skutków zdrowotnych dla konsumentów. Jednak, z uwagi na zróżnicowany wpływ tego dodatku na właściwości fizyczne, teksturalne i sensoryczne, ilość takiego dodatku musi być dostosowywana indywidualnie do konkretnego produktu i jego właściwości.

4.5. PODSUMOWANIE

Wytworzenie nowego asortymentu modyfikatorów skrobiowych budzi zainteresowanie wielu firm, m.in. przemysłu rolno-spożywczego i chemicznego, na całym świecie. Opracowanie taniej i prostej w zastosowaniu technologii produkcji skrobi modyfikowanej ciśnieniowo-termicznie, opierającej się na wykorzystaniu polskiej myśli technicznej, pozwoli

na zwiększenie innowacyjności gospodarki naszego kraju. Biodegradowalne pianki opakowaniowe mogą stać się uzupełnieniem istniejącej oferty opakowań, wytworzonych z tradycyjnych tworzyw sztucznych. Produkcja skrobi modyfikowanej metodą ekstruzji może być szansą dla rolników i grup producenckich, zajmujących się uprawą i przetwarzaniem surowców skrobiowych na terenach typowo rolniczych. W strategiach rozwoju wielu województw, szczególnie tak zwanej „ściany wschodniej”, dąży się do zwiększenia innowacyjności regionów. Bardzo pożądane byłoby, aby na terenach rolniczych, blisko źródła surowca, przetwarzać tani materiał typowo rolniczy, taki jak skrobia, a sprzedawać produkt przemysłowy o dużo wyższej wartości. Wykorzystanie polskich ekstruderów wysokiej jakości, tańszych od zachodniej konkurencji, daje szansę na wsparcie rodzimego przemysłu i poprawę konkurencyjności na rynku europejskim.

Na podstawie prac prezentowanych jako powiązany tematycznie cykl publikacji pt. „Modyfikacja skrobi metodą ekstruzji na cele spożywcze i opakowaniowe” można stwierdzić, że zastosowanie techniki ekstruzji z użyciem jednoślimakowego zmodyfikowanego ekstrudera TS-45 umożliwia wytworzenie skrobi modyfikowanych ciśnieniowo-termicznie o odpowiednich parametrach jakościowych i użytkowych do różnych zastosowań.

Analiza literatury (O1) wykazała wzrost zainteresowania problemem modyfikacji skrobi metodą ekstruzji. Zainteresowanie to skupione jest głównie na zastosowaniu ekstruderów dwuślimakowych. Wciąż brak jest dostatecznej wiedzy dotyczącej zastosowania ekstruderów jednoślimakowych w ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi. Badania literaturowe umożliwiły wybranie grupy parametrów procesu ekstruzji o istotnym znaczeniu dla przebiegu modyfikacji ciśnieniowo-termicznej skrobi z zastosowaniem jednoślimakowego ekstrudera TS-45 o stosunku $L/D=16$.

Zaproponowany w ramach badań sposób ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi znacznie skraca czas i obniża koszty procesu modyfikacji skrobi. Dzięki krótkiemu czasowi przebywania materiału w ekstruderze, od kilkunastu sekund do maksymalnie 2 minut, ogranicza się koszty produkcji. Także nakłady energetyczne związane z wyprodukowaniem 1 kg ekstrudatu są stosunkowo niskie (O2, O3, O4, O5). Równie istotną zaletą jest prostota produkcji, gdyż proces nie wymaga skomplikowanych reakcji chemicznych, wysokoenergetycznych suszarni, itp.

Wyniki przeprowadzonych prac eksperymentalnych (O4, O5, O6, O8) potwierdziły, że istnieją zależności pomiędzy zastosowanymi parametrami procesu ekstruzji a właściwościami otrzymanych modyfikatów skrobiowych. Zastosowanie odpowiednich

parametrów procesu, tj. rodzaju skrobi, temperatury obróbki, wilgotności surowców, prędkości obrotowej ślimaka oraz zawartości plastyfikatora, wpływających na przebieg kleikowania skrobi i jej ekspandowanie, umożliwia kształtowanie najbardziej pożądaných cech modyfikatorów skrobiowych. Zastosowane w prezentowanym osiągnięciu parametry procesu ekstruzji mogą być z powodzeniem stosowane w praktyce produkcyjnej do uzyskiwania nowoczesnych i konkurencyjnych modyfikatorów skrobiowych, mogących znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym i opakowaniowym.

Zastosowanie dodatków funkcjonalnych, w postaci plastyfikatorów, środka spieniającego i innych substancji pomocniczych, potwierdziło ich korzystny wpływ na właściwości użytkowe pianek ze skrobi termoplastycznej (**O7**). Nowe rozwiązanie, w postaci zastosowania środka spieniającego, stosowanego dotąd w przetwórstwie tworzyw sztucznych, umożliwia wytworzenie pianek opakowaniowych o właściwościach zbliżonych do pianek z tworzyw sztucznych. Dodatkowo, z uwagi na stosunkowo łatwą biodegradację, taki rodzaj modyfikatorów skrobiowych może z powodzeniem pełnić rolę biodegradowalnego materiału opakowaniowego.

Skrobie modyfikowane ciśnieniowo-termiczne mogą być także stosowane w formie dodatków funkcjonalnych do żywności w przemyśle spożywczym. Badania wykazały (**O9**) wpływ tak modyfikowanej skrobi na właściwości fizyczne, teksturalne i sensoryczne produktów spożywczych. Z uwagi na coraz większe zainteresowanie konsumentów zdrową, pozbawioną „chemii” żywnością, skrobie ekstrudowane mogą stanowić bezpieczną alternatywę dla skrobi modyfikowanych chemicznie lub innych chemicznych dodatków do żywności (np. emulgatory czy stabilizatory). Nadal konieczne są dalsze badania w tym kierunku w celu doboru odpowiednich parametrów procesu ekstruzji do konkretnych zastosowań modyfikatorów skrobiowych.

Zaproponowane w prezentowanym osiągnięciu naukowym rozwiązania techniczne i technologiczne mogą być bezpośrednio adaptowane w warunkach małej i średniej wytwórczości. Dużą zaletą jest łatwość i prostota dostosowania przedstawionych w osiągnięciu parametrów procesu do praktyki przemysłowej przy zastosowaniu zmodyfikowanego ekstrudera TS-45.

4.6 LITERATURA

1. Adhikari B., Howes T., Bhandari B.R., Truong V., 2003. Experimental studies and kinetics of single drop drying and their relevant in drying of sugar-rich foods: A review. *International Journal of Food Properties*, 3, 323-351.
2. Ashogbon A.O., Akintayo E.T., 2014. Recent trend in physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. *Starch*, 66, 41-57.
3. Barron, C., Bouchet, B., Della Valle, G., Gallant, D. J., Planchot, V., 2001. Microscopical Study of the Destructuring of Waxy Maize and Smooth Pea Starches by Shear and Heat at Low Hydration. *Journal of Cereal Science*, 33, 3, 289-300.
4. Bindzus W., Livings S.J., Gloria – Hernandez H., Fayard G., van Lengerich B., Meuser F., 2002. Glass transition of extruded wheat, corn and rice starch. *Starch*, 54, 393-400.
5. Błaszczak W., Valverde S., Fornal J., 2005. Effect of high pressure on the structure of potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 59, 377-383.
6. Camire M.E., Camire A., Krumhar K., 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Food Science and Nutrition*, 29, 1, 35-57.
7. Cheyne A., Barnes J., Gedney S., Wilson D.I., 2005. Extrusion behaviour of cohesive potato starch pastes: II. Microstructure–process interactions. *Journal of Food Engineering*, 66, 1, 13-24.
8. De Graff R.A., 1996. The use of twin screw extruders as starch modification reactors. rozprawa doktorska, Uniwersytet Groningen, Groningen.
9. Guy R., 2001. Extrusion - Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Ltd., Woodhead Publishing, Wielka Brytania.
10. Hagenimana A., Ding X., Fang T., 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43, 1, 38-46.
11. Han Z., Zeng., X., Zhang B., Yu S., 2009. Effect of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch. *Journal Of Food Engineering*, 93, 318-323.
12. Harper J.M., 1981. Extrusion of Foods. vol. II. CRC Press, Inc., Floryda, USA.
13. Jones D., Chinnaswamy R., Tan Y., Hanna M., 2000. Physiochemical properties of ready-to-eat breakfast cereals. *Cereal Foods World*, 4, 164-167.
14. Kaur B., Ariffin F., Bhat R., Karim A.A., 2012. Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26, 398-404.
15. Mercier C., Linko P., Harper J., 1989. Extrusion Cooking. AACC In., St. Paul, Minnesota, USA.

16. Miladinov, V.D.; Hanna, M.A., 2001. Temperatures and ethanol effects on the properties of extruded modified starch. *Industrial Crops and Products*, 13, 1, 21 – 28.
17. Moscicki L. Janssen L.P.B.M., 2011. *Thermoplastic starch*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
18. Mościcki L., Mirtus M., Wójtowicz A., 2007. *Technika ekstruzji w przemyśle rolnospożywczym*. PWRiL, Warszawa.
19. Moraru C.I., Kokini J.L., 2003. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2, 147-165.
20. Nabeshima, E.H., Grossmann, M.V.E., 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. *Carbohydrate Polymers*, 45, 4, 347-353.
21. Nemtanu M.R., Minea R., 2006. Functional properties of corn starch treatment with corona electrical discharges. *Macromolecular Symposia*, 245-246, 525-528.
22. Oniszczyk T., Mitrus M., Wójtowicz A., Mościcki L., 2015. Addition of bark in the production of the starch-based composites. *Przemysł Chemiczny*, 94, 1748-1751.
23. Quing B., Ainworth P., Tucker G., Marson H., 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 66, 283-289.
24. Ryu G.H., Ng P.K.W., 2001. Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch*, 53, 147-154.
25. Sharma S., Singh N., Singh B., 2015. Effect of extrusion on morphology, structural, functional properties and in vitro digestibility of corn, field pea and kidney bean starches. *Starch*, 67, 721-728.
26. Singh J., Kaur L., McCarthy O., 2007. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, 21, 1, 1-22.
27. Singh N., Smith A.C., 1997. A comparison of wheat starch, whole wheat meal and oat flour in the extrusion cooking process. *Journal of Food Engineering*, 34, 15-32.
28. Stasiak M., Molenda M., Horabik J., Mueller P., Opaliński I., 2014. Mechanical properties of potato starch modified by moisture content and addition of lubricant. *International Agrophysics*, 28, 501-509.

29. Szymońska J., Krok F., Komorowska-Czepirska E., Rębilas K., 2003. Modification of granular potato starch by multiple deep-freezing and thawing. *Carbohydrate Polymers*, 52, 1-10.
30. Thomas D., Atwell W., 1997. *Starches*. AACC, Minnesota, USA.
31. van den Einde R.M., Bolsius A., van Soest J.J.G., Janssen L.P.B.M., van der Goot A.J., Boom R.M., 2003. The effect of thermomechanical treatment on starch breakdown and the consequences for the process design. *Carbohydrate Polymers*, 55, 1, 57-63.
32. Wang J., Jin Z., Yuan X., 2007. Preparation of resistant starch from starch–guar gum extrudates and their properties. *Food Chemistry*, 101, 1, 20-25.
33. Wiedmann W., Strobel E., 1991. Compounding of thermoplastic starch with twin-screw extruders. *Starch*, 43, 138-145.
34. Wilska-Jeszka J., 1994. Polisacharydy, w: *Chemiczne i funkcjonalne składniki żywności*, red. Sikorski Z, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 132-166.
35. Wolf B., 2010. Polysaccharide functionality through extrusion processing. 15, 50-54.
36. Xie F., Yu L., Liu H., Chen L., 2006. Starch modification using reactive extrusion. *Starch*, 58, 131-139.
37. Yang H. Zhengbiao G.U., 2010. Morphology of modified starches by different methods. *Food Research International*, 43, 767-772.
38. Zarguili I., Maache-Rezzoug Z., Loisel C., Doublier J.L. 2006. Influence of DIL hydrothermal process conditions on the gelatinization properties of standard maize starch. *Journal of Food Engineering*. 77, 454-461.

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH (ARTYSTYCZNYCH)

W latach 1990-1995 studiowałem na kierunku *Fizyka*, specjalność: *fizyka doświadczalna* Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Stopień magistra uzyskałem w październiku 1995 roku na podstawie obrony pracy magisterskiej pt.: „*Technologia i badanie własności nadprzewodników wysokotemperaturowych*” pod kierunkiem dr hab. Zbigniewa Korczaka.

Pracę w Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie rozpocząłem we wrześniu 1996 roku na stanowisku asystenta w Katedrze Inżynierii Procesowej. Na początku pracy zawodowej pod kierunkiem prof. dr hab. Leszka Mościckiego moje zainteresowania naukowe związane, były z zastosowaniem niekonwencjonalnych technik ogrzewania, głównie

mikrofalowego, w przetwórstwie rolno-spożywczym. Wynikiem tych zainteresowań są publikacje naukowe (**A1, A2, A4, A5**)* oraz wystąpienia na konferencjach (**R2**)*.

Katedra, obecnie Zakład Inżynierii Procesowej jest wiodącą w kraju jednostką naukową, zajmującą się szeroko pojętymi zagadnieniami związanymi z ciśnieniowo-termiczną obróbką surowców roślinnych. W związku z tym, w kręgu moich zainteresowań pojawiły się zagadnienia dotyczące zastosowania techniki ekstruzji w przetwórstwie rolno-spożywczym, konstrukcji urządzeń, energochłonności procesu oraz związków pomiędzy parametrami w/w procesu a właściwościami produktów ekstrudowanych. Z uwagi na uczestnictwo ówczesnej Katedry Inżynierii Procesowej w latach 1993-1999 w 2 programach europejskich (EU Project No: 5840-COST'93 oraz EUREKA - EU 1274 VALEUREX), brałem czynny udział w badaniach dotyczących obu programów. Wynikiem moich zainteresowań i prac badawczych w programach były oryginalne prace naukowe (**A3, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12**) oraz uczestnictwo w konferencjach naukowych (**R1, R3, R4, K1**).

W latach 2001-2004 uczestniczyłem jako jeden z głównych wykonawców w projekcie badawczym CRAFT 5 PR UE BIOPACK Nr 138982: „*BIOdegradable extruded starch-based plastic for PACKaging material*”. W projekcie tym prowadziłem badania związane z możliwością wykorzystania techniki ekstruzji do produkcji skrobi termoplastycznej oraz wpływu parametrów procesu ekstruzji na właściwości fizykochemiczne skrobi termoplastycznej. W badaniach głównymi surowcami były skrobia ziemniaczana, skrobia pszenna i skrobia kukurydziana. W w/w projekcie odpowiadałem za opracowanie technologii produkcji granulatów TPS uzyskanych z wykorzystaniem ekstrudera jednoślizakowego TS-45 oraz za badania właściwości fizykochemicznych uzyskiwanych skrobi termoplastycznych. Brałem także udział w badaniach procesu wytwarzania folii biodegradowalnej ze skrobi termoplastycznej metodą wytłaczania z rozdmuchem. Część badań, dotyczącą właściwości skrobi termoplastycznej, przeprowadzono w Zakładzie Inżynierii Chemicznej w Królewskim Uniwersytecie (RUG) w Groningen (Holandia), ponieważ projekt realizowany był we współpracy międzynarodowej, dzięki finansowemu wsparciu UE. W tym czasie przebywałem czterokrotnie na krótkoterminowych stażach naukowych w w/w placówce (łącznie 14 tygodni). Staże polegały na realizowaniu zadań badawczych związanych z tematyką projektu oraz prowadzeniu ćwiczeń laboratoryjnych ze studentami RUG. Uczestnictwo w tym projekcie pozwoliło mi poszerzyć wiedzę z zakresu inżynierii

* Lista opublikowanych prac twórczych, innych niż składające się na osiągnięcie naukowe, (oznaczenia A i F) oraz wykaz uczestnictwa w konferencjach naukowych (oznaczenia K i R) znajdują się w zał. IV

materiałowej, wnikliwie zapoznać się z funkcjonowaniem laboratorium, unikatową aparaturą będącą na wyposażeniu Zakładu Inżynierii Chemicznej. W wyniku bezpośredniego porozumienia pomiędzy prof. dr hab. L. Mościckim i prof. dr L.P.B.M. Janssenem prace badawcze związane z moją rozprawą doktorską prowadziłem tzw. systemem „sandwich” – przemienne w Polsce i w Holandii.

Realizację celu mojej dysertacji doktorskiej pt. *„Wpływ obróbki barotermicznej na zmiany właściwości fizycznych biodegradowalnych biopolimerów skrobiowych”* oparłem o doświadczenia wykonywane w Katedrze Inżynierii Procesowej Akademii Rolniczej w Lublinie oraz w Zakładzie Inżynierii Chemicznej Królewskiego Uniwersytetu Groningen w Holandii w latach 2001 – 2003. Podjęty temat rozprawy doktorskiej obejmował szeroki zakres doświadczeń, w tym między innymi:

- badanie przebiegu procesu ekstruzji skrobi termoplastycznej;
- ocenę właściwości fizycznych:
 - ocenę gęstości skrobi termoplastycznej,
 - pomiar temperatury przejścia szklistego,
 - badanie właściwości mechanicznych skrobi termoplastycznej,
 - badanie właściwości lepko-sprężystych skrobi termoplastycznej,
 - badanie mikrostruktury skrobi termoplastycznej.

Dnia 03.06.2004 r., decyzją Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Akademii Rolniczej w Lublinie, uzyskałem stopień doktora nauk w dyscyplinie naukowej Inżynierii Rolniczej (specjalność – Inżynieria i Aparatura Przemysłu Spożywczego). Na wniosek recenzentów (m.in. prof. dr ir. Leon P.B.M. Janssen) rozprawa została wyróżniona nagrodą JM Rektora.

Rezultaty przeprowadzonych prac badawczych, między innymi zawartych w doktoracie, posłużyły do przygotowania szeregu oryginalnych prac twórczych z zakresu przetwórstwa bipolimerów (**F1, F2, F3, A13-A26**), były też prezentowane na konferencjach krajowych i zagranicznych (**R5, R6, R7, R8, K2, K3, K4, K5, K6**).

W roku 2005, od 14 marca do 1 czerwca, przebywałem na stażu zawodowym w zakładzie produkcyjnym „ELA – Wyrób Foli i Opakowań”, mieszczącym się w Ostrowie k/ Warszawy. Pobyt w zakładzie pozwolił mi zapoznać się z przemysłową technologią produkcji różnorodnych folii opakowaniowych. W czasie stażu zapoznałem się z technologią wytwarzania folii z tworzyw sztucznych z zastosowaniem techniki wytłaczania z rozdmuchem, metodami badań materiałów opakowaniowych, nowoczesnymi technikami druku oraz metodami recyklingu i ponownego zagospodarowania materiałów opakowaniowych. Podczas stażu szczególną uwagę zwróciłem na możliwość zastosowania

materiałów biodegradowalnych do produkcji opakowań (folii). Ponadto przeprowadziłem liczne testy cech fizycznych uzyskanych folii w laboratorium przyzakładowym.

Zdobyte doświadczenie pozwoliło mi w dokładniejszy sposób przekazać wiedzę studentom na ćwiczeniach laboratoryjnych z przedmiotów „Technologia chemiczna” i „Materiały biodegradowalne” związanych z produkcją i badaniem materiałów z tworzyw sztucznych.

Po obronie pracy doktorskiej moje zainteresowania dotyczące przetwórstwa skrobi uległy rozszerzeniu o temat ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi. W roku 2009 pozyskałem grant badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego N N313 065936 „*Badania procesu ciśnieniowo-termicznej modyfikacji skrobi*” którego zostałem kierownikiem. W trakcie realizacji zadań badawczych związanych z w/w tematem wykorzystano różne rodzaje skrobi w celu ich modyfikacji za pomocą zmodyfikowanego ekstrudera jednoślismakowego TS-45. W trakcie badań określono wpływ parametrów procesu ekstruzji na właściwości fizykochemiczne i strukturalne modyfikatów skrobiowych. Oceniano także możliwość zastosowania skrobi modyfikowanych metodą ekstruzji jako dodatków funkcjonalnych w produkcji przekąsek. Podczas realizacji tego projektu nawiązałem współpracę z Instytutem Agrofizyki PAN w Lublinie. Szczegółowy opis wyników grantu zawiera raport merytoryczny oraz publikacje (**A29, A38, publikacje wchodzące w skład osiągnięcia**). Były one także prezentowane na licznych konferencjach i sympozjach naukowych w kraju i za granicą (**R9-R13, K9, K12-K18**).

W roku 2008 zostałem jednym z głównych wykonawców w projekcie N N312 162334 finansowanym przez MNiSW pt. „*Wpływ obróbki ciśnieniowo-termicznej na jakość wzbogacanych makaronów podgotowanych*”. Projekt dotyczył możliwości zastosowania techniki ekstruzji w produkcji makaronów podgotowanych i typu instant. Efektem mojego udziału w projekcie były publikacje (**A27, A28**).

W pracy badawczej kontynuowałem także swoje zainteresowania dotyczące materiałów biodegradowalnych oraz przetwórstwa skrobi termoplastycznej. Wyniki tych zainteresowań były publikowane (**A31, A32, A33, A41, A42, A44**) i prezentowane na konferencjach (**K19, K20, K21, K22, K27, K28, K30, K32, K33, K36**). Dodatkowo, w latach 2010-2012, byłem jednym z głównych wykonawców w dwóch grantach finansowanych przez MNiSW, związanych z produkcją i badaniami materiałów biodegradowalnych. Pierwszy z nich to N N313 275738 (2010-2012): „*Wpływ parametrów procesu ekstruzji na właściwości użytkowe biopolimerów skrobiowych z dodatkiem włókien naturalnych*” a drugi to N N313 275838 pt. „*Wpływ warunków obróbki ciśnieniowo-*

termicznej na właściwości fizyczne folii skrobiowych otrzymywanych metodą rozdmuchu". Podczas realizacji w/w projektów uczestniczyłem w badaniach związanych z wytworzeniem nowego typu granulatów TPS oraz określeniem wpływu procesu obróbki na jego właściwości użytkowe. W kolejnym etapie badań przeprowadzono próby związane z wytłaczaniem folii biopolimerowej. Wynikiem przeprowadzonych badań były następujące publikacje (**F4, F5, A34, A35, A37**).

Udział w tych wszystkich projektach pozwolił mi wzbogacić mój warsztat naukowy i zdobyć cenne doświadczenie zawodowe. Technika ekstruzji i jej możliwości zastosowania w przemyśle rolno-spożywczym są bardzo szerokie. W związku z tym kolejnym nurtem moich zainteresowań jest wytwarzanie żywności prozdrowotnej z dodatkami funkcjonalnymi - roślinami leczniczymi i mąkami pełnoziarnistymi. Badania, prowadzone także we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi, dotyczyły m.in. wytwarzania produktów instant, takich jak zbożowe kaszki dla dzieci (**A40, K23**), przekąsek (**F7, A39, A43, A45, K24, K29, K35, K37**), makaronów (**F6, K25**). Interesuję się także możliwością wykorzystania techniki ekstruzji do zagospodarowania odpadów pochodzenia roślinnego m.in. na cele energetyczne (**K34**).

Moja działalność naukowa została kilkakrotnie doceniona przez władze Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. W latach 2005 oraz 2015 otrzymałem nagrodę indywidualną III stopnia oraz nagrodę indywidualną II stopnia za osiągnięcia naukowe. Otrzymywałem także nagrody zespołowe za osiągnięcia naukowe w latach 1998, 2003, 2009, 2011, 2012.

Pomimo wielu aspektów zainteresowań naukowych, głównym nurtem moich dociekań była, i pozostaje, problematyka związana z przetwórstwem skrobi na cele spożywcze i opakowaniowe. Dzięki zdobytemu doświadczeniu w pozyskiwaniu grantów badawczych w dalszym ciągu zabiegam o zdobycie nowych projektów badawczych.

6. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWO-BADAWCZEGO

Mój dotychczasowy dorobek naukowy związany jest, przede wszystkim, z zainteresowaniami badawczymi dotyczącymi procesu ekstruzji surowców roślinnych. Obejmuje łącznie 101 pozycji (61 prac to publikacje recenzowane – zał. IV), w tym 49 to oryginalne prace twórcze (4 w czasopismach niepuktowanych), 1 monografia napisana w j. polskim, 7 rozdziałów w monografiach napisanych w j. angielskim, 4 rozdziałów w monografiach w j. polskim, 8 artykułów popularno-naukowy oraz 32 streszczenia opublikowane w materiałach pokonferencyjnych. Spośród 49 prac oryginalnych, 31 prac napisano w języku angielskim, 9 to publikacje indeksowane w bazie Journal Citation Reports (JCR), posiadające Impact Factor. W 10 pracach jestem jedynym autorem, a w pozostałych współautorem ze znacznym wkładem w ich przygotowanie.

Tabela 1. Syntetyczne zestawienie całego dorobku naukowego

Rodzaj publikacji	Język	Przed doktoratem			Po doktoracie			Łącznie
		Indywidualne	Zbiorowe	Łącznie	Indywidualne	Zbiorowe	Łącznie	
Oryginalne prace twórcze								
W czasopismach z <i>Impact Factor</i>	A	0	0	0	0	8	8	8
	P	0	0	0	0	1	1	1
Prace oryginalne opublikowane w czasopismach recenzowanych	A	0	2	2	4	17	21	23
	P	2	8	10	1	6	7	17
Inne prace								
Monografia	A	0	0	0	0	0	0	0
	P	0	0	0	0	1	1	1
Rozdziały w monografii	A	0	0	0	2	5	7	7
	P	0	0	0	1	3	4	4
Prace popularno-naukowe opublikowane w czasopismach recenzowanych	P	0	4	4	0	4	4	8
Streszczenia pokonferencyjne	P	0	2	2	1	29	30	32
Łącznie		2	16	18	9	74	83	101

Tabela 2. Punktacja opublikowanych prac wg MNiSW

Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	IF ^a	Suma punktów MNiSW	
			zgodnie z rokiem wydania *	w roku 2017**
Osiągnięcie naukowe				
Chemical Engineering Research and Design;	1	2,348	30	30
International Journal of Food Engineering;	1	0,685	15	15
Acta Agrophysica;	2	-	11	28
Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa;	4	-	24	32
Rozdział w monografii (j. polski);	1	-	7	4
Razem	9	3,033	87	109
Pozostałe publikacje				
Czasopisma wyróżnione w bazie JCR				
Polish Journal of Environmental Studies;	1	0,963	10	15
International Agrophysics;	2	1,647	31	50
Food Research International	1	3,005	40	40
Przemysł Chemiczny;	1	0,399	15	15
Journal of Food Science;	1	1,649	30	30
Journal of Food Science and Technology;	1	1,262	25	25
Publikacje indeksowane w bazie Web of Science				
Agriculture and Agricultural Science Procedia;	2	-	30	30
Proceedings of 5 th International Congress Flour-Bread'09	1	-	10	10
Rozdział w monografii (j. angielski)	1	-	5	10
Pozostałe czasopisma punktowane				
Acta Agrophysica;	2	-	8	28
International Agrophysics;	3	-	18	75
Inżynieria Rolnicza;	4	-	18	40
Journal of Ecological Engineering;	1	-	12	12
Postępy Nauk Rolniczych;	1	-	2	-
Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego;	4	-	16	24
Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa;	12	-	73	72
Monografia (j. polski)	1	-	21	25
Rozdziały w monografiach (j. polski)	3	-	15	12
Rozdziały w monografiach (j. angielski)	6	-	28	30
Publikacje bez składki	48	8,925	407	543
Publikacje punktowane łącznie	57	11,958	494	652
<i>Publikacje punktowane łącznie przed doktoratem</i>	8	0	33	67
<i>Publikacje punktowane łącznie po doktoracie</i>	49	11,958	461	585

*Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku publikacjach z roku 2017, przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2016

**Punktacja MNiSW określona według aktualnie obowiązującej listy z dnia 31 grudnia 2016

^a IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2017 podano ostatni dostępny IF₂₀₁₆ według JCR

SUMA PUNKTÓW UZYSKANYCH ZA DOTYCHCZASOWE PUBLIKACJE:

Całkowita liczba punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania publikacji:	494
Całkowita liczba punktów MNiSW zgodnie z aktualną listą czasopism:	652
Sumaryczny IF zgodnie z rokiem wydania publikacji wg JCR:	11,958

Suma po odjęciu punktów za cykl publikacji powiązanych tematycznie, składających się na osiągnięcie naukowe:

Liczba punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania publikacji:	407
Liczba punktów MNiSW zgodnie z aktualną listą czasopism:	543
IF zgodnie z rokiem wydania publikacji wg JCR:	8,925
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	53
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS):	4

Informacje dotyczące osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych i popularyzatorskich, zamieszczone zostały w zał. IV.

Marcin Mitrus