

Załącznik II

AUTOREFERAT Opis dorobku i osiągnięć naukowych

Dr inż. Ryszard Kulig

Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu
Spożywczego

Wydział Inżynierii Produkcji

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Doświadczalna 44

20-280 Lublin

e-mail: ryszard.kulig@up.lublin.pl

Lublin 2015

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	8
4.4. Materiały i metody	9
4.5. Syntetyczny opis prac.....	12
4.6. Podsumowanie.....	35
4.7. Literatura	38
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	43
6. Podsumowanie dorobku naukowo-badawczego	52

1. DANE PERSONALNE

Imię i Nazwisko: **Ryszard Kulig**

Miejsce pracy:

Dr inż. Ryszard Kulig
Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego
Wydział Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 44
20-280 Lublin

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

a) **magister inżynier**, kierunek: technika rolno-spożywcza, Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej, 16.10.1996 r., temat pracy magisterskiej: *„Wpływ czasu blanszowania marchwi na kinetykę procesu suszenia”*;

Promotor: prof. dr hab. Tadeusz Lis

b) **doktor nauk rolniczych** w zakresie inżynierii rolniczej, specjalność – inżynieria przemysłu rolno-spożywczego, Rada Wydziału Inżynierii Produkcji Akademii Rolniczej w Lublinie, 18.12.2003 r., temat pracy doktorskiej: *„Proces kondycjonowania surowców roślinnych poddawanych granulowaniu”*;

Promotor: prof. dr hab. Janusz Laskowski

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:

16.12.1996 – 29.02.2004	Stanowisko: asystent Akademia Rolnicza w Lublinie Wydział Techniki Rolniczej (od 01.10.2003 r. Wydział Inżynierii Produkcji) Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego
styczeń – czerwiec 1997 r.	<i>przerwa w związku z odbywaniem szkolenia wojskowego</i>

01.03.2004 – obecnie	Stanowisko: adiunkt Akademia Rolnicza w Lublinie (od 17.04.2008 r. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie) Wydział Inżynierii Produkcji Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego
----------------------	--

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 NR 164, POZ. 1365, ORAZ DZ. U. Z 2001 R., NR 84, POZ. 455):

4.1. OKREŚLENIE OSIĄGNIĘCIA

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

**” WYBRANE ASPEKTY DOSKONALENIA EFEKTYWNOŚCI PROCESU
GRANULOWANIA MATERIAŁÓW PASZOWYCH”**

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

b) wykaz prac dokumentujący osiągnięcie naukowe:

- O1. **Kulig R.**, Laskowski J., 2006. Wpływ parametrów matrycy na efektywność granulowania mieszanek pszenicy z rzepakiem. Inżynieria Rolnicza 5(80), 375–384. (4 pkt wg MNiSW^c).
- O2. **Kulig R.**, Laskowski J., 2006. Nakłady energii w procesie granulowania śrut pszenicy o różnym stopniu rozdrobnienia. Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 8A, 187–192. (4 pkt wg MNiSW^c).
- O3. **Kulig R.**, Laskowski J., 2008. Energy requirements for pelleting of chosen feed materials with relation to the material coarseness. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 8, 115–120. (6 pkt wg MNiSW^c).
- O4. **Kulig R.**, 2010. Wpływ stopnia rozdrobnienia wybranych surowców roślinnych na właściwości fizyczne materiału przetworzonego w procesie granulowania. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 55 (1), 59–62. (6 pkt wg MNiSW^c).
- O5. **Kulig R.**, Laskowski J., 2009. Energy requirements for the pelleting of Broiler Premium Grower diets with a different soybean oil content. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 9, 138–144. (6 pkt wg MNiSW^c).
- O6. **Kulig R.**, Laskowski J., Gawłowski S., 2009. Efektywność granulowania mieszanek paszowych typu DKA Starter i Grower zawierających lniankę. Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 11, 104–109. (4 pkt wg MNiSW^c).

- O7. **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. (5 pkt wg MNiSW^c).
- O8. Skonecki S., **Kulig R.**, Łysiak G., 2014. Models of pressure compaction and their application for wheat meal. *International Agrophysics*, 28 (1), 125–130. (25 pkt wg MNiSW^c; IF₂₀₁₄ = 1,117^a; IF_{5-year} = 1,034^b).
- O9. **Kulig R.**, Łysiak G., Skonecki S., 2015. Prediction of pelleting outcomes based on moisture versus strain hysteresis during the loading of individual pea seeds. *Biosystems Engineering*, 129 (1), 226–236. (35 pkt wg MNiSW^c; IF₂₀₁₄ = 1,619^a; IF_{5-year} = 1,960^b).

ŁĄCZNIE (OSIĄGNIĘCIE):

- Impact factor **2,736^a; (2,994^b)**
- Punkty MNiSW **95^c**

^a IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2015 podano ostatni dostępny IF₂₀₁₄

^b IF_{5-year} – średni pięcioletni impact factor

^c Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku braku danych przy publikacji z roku 2015, przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2014

Wkład wnioskodawcy w powstanie każdej z ww. publikacji obejmował autorstwo hipotez i koncepcji badawczych oraz wykonanie doświadczeń, analizę i opracowanie wyników badań i ich dyskusję, jak również przygotowanie manuskryptów. Oświadczenia współautorów, wraz z określeniem ich indywidualnego wkładu 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

W przemyśle rolno-spożywczym, proces granulowania pozostaje dotychczas dominującą formą aglomerowania ciśnieniowego materiałów roślinnych. Znajduje on przede wszystkim szerokie zastosowanie w produkcji pasz przemysłowych oraz biopaliw stałych. Proces najczęściej realizowany jest w układzie roboczym „matryca – rolki wytłaczające”. Uzyskany produkt posiada stałą formę geometryczną, zdeterminowaną wielkością i kształtem otworów matrycy (Hejft 2012).

Z danych literaturowych wynika, że w obszarze sektora B&R proces granulowania jest ciągle podatnym gruntem do prowadzenia badań i rozwoju nowych idei (Tumuluru i in., 2010). Oprócz zmieniających się uwarunkowań techniczno-technologicznych (Nilsson i in., 2011; Fairchild, 2014; Obidziński i Hejft, 2013a; Hejft i Obidziński, 2015), przyczyniają się do tego również zmiany zachodzące w zakresie przerabianych surowców i sposobie ich przygotowania do procesu aglomerowania. W przemyśle paszowym wiąże się to przykładowo z wprowadzaniem do hodowli nowych genotypów zwierząt, które mają nowe, specyficzne wymagania żywieniowe. Następstwem tego jest przetwarzanie mieszanek o innym niż w przeszłości składzie surowcowym. Jednocześnie poszukuje się alternatywnych, tańszych składników pasz (Stender i Honeyman, 2008; Buchanan i in., 2010; Loar i Corozo, 2011). Również w sektorze biopaliw stałych pojawiają się stale nowe formy hodowlane roślin energetycznych, czy też podejmowane są próby zagospodarowania różnych surowców odpadowych z przemysłu rolno-spożywczego i drzewnego (Frączek, 2010; Zarajczyk, 2013; Chadwick i in., 2014; Obidziński 2014). To wszystko w połączeniu z mnogością czynników wpływających na przebieg procesu granulowania oraz właściwości produktu finalnego (Laskowski, 1989; Kaliyan i Vance Morey, 2009; Zawiślak i in., 2010b; Obidziński i Hejft, 2012; Abdollahi i in., 2013b), wymusza konieczność kontynuowania badań w tym zakresie.

Niesłabnące zainteresowanie procesem granulowania w przemyśle paszowym wynika głównie z uzyskiwanych korzyści, związanych zarówno z postacią fizyczną paszy – wzrost gęstości nasypowej, ułatwienie manipulowania, zapobieganie segregacji składników – jak też poprawą jej wartości odżywczych (Abdollahi i in., 2011; Chewing i in. 2012). Karmienie zwierząt granulatem pozwala na zwiększenie wartości podstawowych wskaźników hodowlanych (Lundblad i in., 2011), tj. średniego dziennego spożycia paszy (ADFI) i średniego dobowego przyrostu masy (ADG). Przy czym, osiągnięcie odpowiednich korzyści żywieniowych zależy istotnie od stosowania granulatu wysokiej jakości, zawierającego jak najmniejsze ilości cząstek rozkruszonych (Cutlip i in., 2008; Corzo i in., 2011). Segregacja składników za przyczyną rozpadu produktu złej jakości, prowadzi do pobierania przez zwierzęta paszy o różnej koncentracji składników pokarmowych. W takim przypadku (z ekonomicznego punktu widzenia) dochodzi również do strat paszy, głównie na skutek rozsypywania.

W ostatnich latach w przemyśle dokłada się wszelkich starań, aby w jak największym stopniu zwiększać efektywność produkcji. W realiach współczesnej gospodarki, postępowanie takie jest często niezbędne dla zapewnienia długofalowego funkcjonowania przedsiębiorstwa. Dążenie do poprawy efektywności poprzez ciągle doskonalenie – które

zapoczątkował E.W. Deming – jest podstawą postępu techniczno-technologicznego procesów produkcyjnych (Deming, 1996). Ma to także swoje uzasadnienie w kontekście procesu granulowania, a wiąże się głównie z tym, że granulator w linii technologicznej aglomerowania ciśnieniowego jest tzw. „wąskim gardłem”. Stąd też wszelkie działania zmierzające do wzrostu jego wydajności, wpływają na możliwość zwiększenia zdolności przerobowej całej linii produkcyjnej.

Jak podaje norma ISO 9000, efektywność to relacja między osiągniętymi wynikami a wykorzystanymi zasobami. W odniesieniu do procesu granulowania, efektywność oznacza uzyskiwanie produktu o wymaganych cechach jakościowych przy zachowaniu optymalnej relacji pomiędzy wydajnością procesu i nakładami energii. Najważniejszymi wyróżnikami jakości są takie właściwości gotowego produktu, jak: wytrzymałość kinetyczna i twardość granulatu oraz jego gęstość (Marks i in., 2006; Kulig, 2008a, 2009; Zawislak i in., 2012). Są one istotne zarówno w aspekcie żywieniowym, jak też logistyki dostaw.

Produkcja wysokiej jakości granulatu, przy jednoczesnym dążeniu do wzrostu wydajności i poszanowania energii, wymaga ciągłych badań i doskonalenia procesu technologicznego. Z przeglądu literatury przedmiotu wynika, że większość badań zrealizowanych w tym zakresie odnosi się do właściwości produktu. Natomiast szczególnie zauważalny jest deficyt publikacji związanych z energochłonnością procesu. Dotyczy to zarówno badań nakładów energii cieplnej, ponoszonych podczas kondycjonowania materiału sypkiego, jak też nakładów energii elektrycznej ponoszonych w układzie roboczym prasy. Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest dotychczasowy brak odpowiednio wyposażonych stanowisk badawczych. Jednocześnie utrudniony jest dostęp do danych pochodzących z przemysłu, gdzie za najważniejsze wskaźniki operacyjne uznaje się te, które dotyczą wydajności produkcji oraz jej jakości. Natomiast energii nie traktuje się zazwyczaj jako surowca, a wydatki na nią ponoszone uznaje się za stały składnik kosztów wytwarzania. Jest to jednak błędne podejście, gdyż analiza jej wydatku i podjęcie działań mających na celu zwiększenie efektywności energetycznej procesu, pozwalają znacznie obniżyć koszty operacyjne związane z energią (Wojdalski i Dróżdż, 2012, 2014; Merritt, 2014).

Niezwykle istotne – w wyżej wspomnianym kontekście – są badania obejmujące optymalizację procesów produkcyjnych, która realizuje się poprzez rozpoznanie zależności występujących pomiędzy właściwościami surowców oraz parametrami technicznymi i technologicznymi procesu a jego energochłonnością (Kulig i Laskowski, 2006; Wójtowicz i Mościcki, 2008; Obidziński i Hejft, 2013b). Postępowanie takie znajduje również odzwierciedlenie w dyrektywie 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, jak też

w Krajowym Planie Działań dotyczących efektywności energetycznej 2014, opracowanym na podstawie art. 6 ust. 1 ustawy z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej (Dz. U. Nr 94, poz. 551, z późn. zm.). Przedstawiono tam m.in. wytyczne odnośnie środków poprawy efektywności energetycznej w przemyśle, gdzie często bywa ona bardzo niska. W przypadku procesu granulowania jest to bardzo istotne, gdyż jest on najbardziej energochłonnym procesem jednostkowym wytwarzania pasz aglomerowanych. Z dostępnych danych wynika, że jego udział w strukturze całkowitych nakładów energetycznych – ponoszonych w procesie produkcyjnym – wynosi średnio 45% (Merritt, 2014). Dlatego też racjonalne korzystanie z energii w związku z rosnącymi jej cenami, ma ważne uzasadnienie ekonomiczne i ekologiczne.

Powszechnie akceptowaną podstawą podejmowania wszelkich działań optymalizacyjnych, jest przedstawiona przez Reimer'a (1992) struktura wkładu różnych czynników w kształtowanie właściwości fizycznych granulatu, które determinują również wydajność i energochłonność wytwarzania. Według autora, przebieg procesu i jakość otrzymywanego produktu zależą proporcjonalnie od takich czynników, jak: skład surowcowy mieszanki – 40%, stopień rozdrobnienia materiału – 20%, kondycjonowanie – 20%, parametry matrycy – 15% i innych – 5%. Przedstawione proporcje mogą się oczywiście zmieniać w zależności od rodzaju analizowanego systemu, który za każdym razem obwarowany jest specyficznymi uwarunkowaniami jego funkcjonowania. Jednak wymienione czynniki zawsze odgrywają dominującą rolę. Stąd też analiza ich wpływu na przebieg procesu i jakość uzyskiwanego produktu, powinna stanowić podstawę działań zmierzających do zwiększania efektywności procesu granulowania.

4.3. CEL I ZAKRES OSIĄGNIĘCIA

Celem podjętych i zaprezentowanych w **publikacjach nr O1–O9** badań była analiza wybranych problemów granulowania materiałów paszowych w kontekście oceny efektywności procesu. W przeprowadzonych badaniach określono oddziaływanie uwarunkowań surowcowych i techniczno-technologicznych systemu wytwarzania na przebieg i energochłonność procesu granulowania materiałów paszowych stosowanych w praktyce przemysłowej oraz jakość uzyskiwanego produktu.

Dla realizacji celu opracowano takie zagadnienia, jak:

1. określenie wpływu parametrów matrycy (**O1**);
2. ustalenie wpływu średniego wymiaru cząstek surowca (**O2, O3, O4**);

3. określenie wpływu warunków kondycjonowania **(O2, O3, O4)**;
4. ocena wpływu modyfikacji składu surowcowego przetwarzanych materiałów **(O1, O5, O6, O7)**;
5. ocena efektywności procesu na podstawie modeli aglomerowania ciśnieniowego **(O8, O9)**.

W zależności od analizowanego zagadnienia, parametry procesu rozpatrywano ze względu na następujące czynniki:

- zmiany gęstości materiału przetworzonego w procesie aglomerowania;
- trwałość mechaniczną gotowego produktu;
- zmiany wilgotności i temperatury materiału przetworzonego w procesie granulowania;
- zużycie pary i ciepła w procesie obróbki hydrotermicznej;
- energochłonność procesu aglomerowania.

4.4. MATERIAŁY I METODY

Realizacja nakreślonego celu osiągnięcia naukowego (p. 4.3.), przy zachowaniu jego wartości użytecznej i poznawczej, wymagała zastosowania w badaniach zróżnicowanej gamy materiałów paszowych. W związku z tym, w badaniach wykorzystano stosowane w żywieniu zwierząt pełnoporcjowe mieszanki paszowe, jak też niektóre surowce zbożowe, strączkowe i oleiste. Zastosowanie w mieszankach zmiennych udziałów wybranych surowców (rzepak, olej sojowy, lnianka, jęczmień i owies nagoziarnisty) pozwalało zarówno na modyfikację ich właściwości, jak też poznanie zakresu oddziaływań wytyczonych w celu osiągnięcia w interakcji z innymi czynnikami, występującymi zazwyczaj w procesie granulowania.

W przypadku oceny wpływu oddziaływania parametrów matrycy (1)* badania wykonano dla śruty pszennej. Jednocześnie wykorzystano mieszaninę śruty pszennej i rzepakowej (O1). Zmienny udział rzepaku w zakresie od 5 do 20% (ze względu na znaczną zawartość tłuszczu) pozwolił na modyfikację właściwości mieszaniny, warunkujących jej zachowanie w trakcie przemieszczania przez otwory matrycy granulatora. Ponadto, stanowił jeden z etapów wykorzystanych w ocenie wpływu modyfikacji składu surowcowego przetwarzanych materiałów (4)*.

Dla oceny wpływu stopnia rozdrobnienia (2)* badania wykonano dla śruty z pszenicy (O2), jęczmienia i łubinu (O3, O4), tj. surowców powszechnie stosowanych jako komponenty mieszanek paszowych, a jednocześnie zdecydowanie różniących się między sobą

właściwościami fizycznymi i chemicznymi. Ze względu na oczekiwane znaczenie wpływu wielkości cząstek na przebieg procesu kondycjonowania, badania te wykonano dla różnych warunków obróbki hydrotermicznej (3)*. Ponadto w pracach O3 i O4 eksperymenty wykonano dla zróżnicowanych co do średniego wymiaru cząstek, a jednocześnie wybranych stosunkowo homogennych wymiarowo frakcji surowców. Pozwoliło to na ocenę oddziaływania warunków kondycjonowania (3)* przy jednoczesnym uwzględnieniu wielkości cząstek oraz wnioskowanie o oddziaływaniu jednorodności mieszanin na przebieg procesu granulowania i właściwości uzyskiwanego granulatu.

Ocena wpływu modyfikacji składu surowcowego (4)* przetwarzanych materiałów objęła badania wykonane na mieszaninie śruty pszennej i rzepakowej (O1), mieszance handlowej typu Brojler Premium Grower o zmiennej zawartości oleju sojowego (O5), a także mieszankach handlowych typu DKA-S i DKA-G ze zmiennym udziałem lnianki (O6) oraz jęczmienia i owsa nagiego (O7).

Weryfikację dopasowania modeli procesu zagęszczania (5)* przeprowadzono na podstawie wyników eksperymentalnych uzyskanych dla śruty pszennej (O8). Próbę szacowania efektywności procesu granulowania, w zależności od właściwości mechanicznych surowca (5)* – uzyskanych w teście histerezy – przeprowadzono dla pojedynczych nasion grochu (O9). Zróżnicowanie wilgotności nasion zapewniło uzyskanie surowca o wyraźnie odmiennych parametrach mechanicznych (lepkosprężystych).

Większość badań – wykonanych w ramach prac stanowiących osiągnięcie naukowe (O1–O7, O9) – zrealizowano na prototypowym stanowisku badawczym procesu granulowania materiałów roślinnych, odzwierciadlającym linię produkcyjną (p. 5, rys. 1). Materiał przed granulowaniem poddawany był obróbce hydrotermicznej w kondycjonerze łopatkowym. Badania prowadzono przy stałej wydajności kondycjonera. Założoną temperaturę materiału po wyjściu z kondycjonera, uzyskiwano w wyniku zmiany natężenia przepływu pary do urządzenia. Prasowanie materiału odbywało się przy użyciu granulatora typu L-175 firmy Amandus Kahl. Układ roboczy granulatora stanowi zestaw składający się z płaskiej nieruchomej matrycy i obrotowych rolek wytłaczających. Matryce (średnica i długość kanału prasującego) dobierane były w zależności od założonego celu i zakresu badań. Granulator typu L-175 przeznaczony jest do prowadzenia prac badawczo-rozwojowych. Urządzenie należy do typoszeregu maszyn wytwarzanych przez firmę Amandus Kahl, co ze względu na bardzo wysoki poziom techniczny maszyn oferowanych

* Numeracja zagadnień opracowanych dla realizacji celu osiągnięcia naukowego – zgodnie z p. 4.3.

przez tego producenta, czyni otrzymane wyniki przydatnymi także w skali praktyki przemysłowej. Oprócz granuladora, w skład stanowiska wchodzi: wytwornica pary typ LW 69, dozownik ślimakowy, kondycjoner łopatkowy oraz komputerowe układy pomiaru zużycia pary, ciepła i energii elektrycznej. Szczegółowy opis wyposażenia stanowiska wspólnie z autorską metodyką określania zużycia pary, ciepła i nakładów energii elektrycznej przedstawiono w pracy Kuliga i Laskowskiego (2002). Aktualny schemat stanowiska, wraz z miejscami pomiaru parametrów informujących o prawidłowości przebiegu procesu technologicznego, przedstawiono w pracy nr O9.

Badania wykonane w ramach pracy nr O8 zrealizowano przy wykorzystaniu prasy hydraulicznej typu ZD 40 (z komputerową rejestracją parametrów procesu ściskania – siły i przemieszczenia tłoka) oraz zespołu prasującego z matrycą zamkniętą (średnica komory zagęszczania wynosiła 25 mm). Schemat prasy i zespołu prasującego przedstawiono w pracy Laskowskiego i in. (2005). Warunki badań zagęszczania były następujące: masa zagęszczanego materiału 0,02 kg, prędkość przemieszczenia tłoka $0,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, maksymalna siła zagęszczania 100 kN (nacisk jednostkowy 200 MPa).

Pomiary właściwości fizycznych materiału sypkiego oraz aglomeratów (wilgotność, temperatura, gęstość) przeprowadzono standardowymi metodami, w oparciu o obowiązujące normy. Poza tym w ochłodzonej granulacie określano procentową zawartość cząstek rozkruszonych, wykorzystując sito o wymiarze oczek o 1 mm mniejszym od średnicy kanałów wytłaczających matrycy. Wytrzymałość kinetyczną granulatu oceniono według PN-R-64834/98, za pomocą testera Pfost'a. Natomiast pomiary wytrzymałości granulatu na ściskanie (twardość), jak też badania histerezy (O9), przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S według opracowanej we własnym zakresie metodyki badawczej.

Podczas badań histerezy stosowano obciążenie 200N, a prędkość przemieszczania głowicy wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Parametry procesu wyznaczono na podstawie uniwersalnych charakterystyk siła-przemieszczenie uzyskanych za pomocą programu testXpert firmy Zwick.

Analizę statystyczną wyników badań wykonano na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ przy wykorzystaniu programu Statistica (Statsoft). Przy wyborze postaci równań stosowano metodę regresji krokowej wstecznej. Istotność współczynników równania regresji badano testem t-Studenta. Natomiast adekwatność modelu sprawdzano stosując test Fishera.

4.5. SYNTETYCZNY OPIS PRAC

1) Praca nr O1

Punktem wyjścia do podejmowania działań optymalizacyjnych procesu granulowania jest dobór parametrów matrycy pod kątem właściwości i przeznaczenia przerabianego materiału. Średnica otworów matrycy determinowana jest przede wszystkim wymaganiami żywieniowymi poszczególnych gatunków i grup wiekowych zwierząt (Cerrate i in., 2009; Abdollahi i in., 2013a, 2013c). Natomiast grubość matrycy dobierana jest w zależności od składu mieszanki (mieszanka o tendencji do uzyskiwania kruchych granul wymaga dłuższej części kalibrującej). Zwykle stosowanie „grubych matryc” pozwala uzyskać spójny i trwały granulat, ale przyczynia się do wzrostu energochłonności prasowania i może powodować problemy technologiczne związane z zapychaniem się otworów matrycy. Natomiast stosowanie matryc „cienkich” podnosi wydajność produkcji, jednak w większej mierze uzależnia wytrzymałość granulatu od właściwego rozdrobnienia i kondycjonowania przerabianego materiału. W celu uzyskania granulatu spełniającego normy jakościowe, do mieszanek o dużej zawartości tłuszczu należy stosować matryce o wyższym stopniu zagęszczania, natomiast do mieszanek mało podatnych na wytłaczanie – matryce o niskim stopniu zagęszczania (Laskowski, 1997).

Badania efektywności procesu granulowania wybranych materiałów paszowych przy wykorzystaniu matryc o zróżnicowanych parametrach zaprezentowano w **publikacji nr O1**:

Kulig R., Laskowski J., 2006. Wpływ parametrów matrycy na efektywność granulowania mieszanek pszenicy z rzepakiem. *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 375–384.

Celem pracy było określenie wpływu średnicy i długości kanałów prasujących matrycy na przebieg procesu granulowania mieszanin pszenicy z rzepakiem. Do badań wykorzystano śrutę z pszenicy odmiany *Emika* oraz mieszaninę śrut z pszenicy i pełnotłustych nasion rzepaku (odmiana *Lirajet*) o zawartości rzepaku od 5 do 20% (co 5%). Celem takiego przygotowania materiału było uzyskanie w nim zmiennej zawartości tłuszczu, która wynosiła odpowiednio: 1,92; 4,14; 6,37; 8,61 i 10,82%. Jednocześnie tak zestawione mieszaniny były zgodne z dopuszczalną zawartością rzepaku w paszach. Z dostępnych badań żywieniowych wynika, że w mieszankach dla drobiu udział rzepaku może dochodzić do 15%, a w mieszankach dla trzody chlewnej nawet do 20% (Landerio i in., 2012).

Badane surowce przed prasowaniem doprowadzano do temperatury 70°C, poprzez obróbkę parą wodną o ciśnieniu 400 kPa. Prasowanie materiału odbywało się przy użyciu granuladora firmy Amandus Kahl typ L-175. W czasie badań stosowano matryce o następujących parametrach: $S = 3$ mm, $D = 20$ mm; $S = 4$ mm, $D = 20$ mm; $S = 4$ mm, $D = 25$ mm; $S = 4$ mm, $D = 30$ mm; $S = 5$ mm, $D = 30$ mm; gdzie (S) oznacza średnicę otworu kanałów prasujących, a (D) długość kanałów prasujących matrycy.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najniższe opory przetłaczania materiału występowały w przypadku stosowania matrycy o parametrach $S = 4$ mm, $D = 20$ mm (średnia temperatura granulatu wynosiła 64°C). Jedynie w odniesieniu do przerobu pszenicy (1,92% tłuszczu) zaobserwowano przyrost temperatury ponad wartość uzyskaną podczas kondycjonowania (przeciętnie o 1°C). Z kolei najwyższe wartości temperatury granulatu (średnio 68°C) zaobserwowano podczas stosowania matrycy o parametrach $S = 4$ mm, $D = 30$ mm. Dla matrycy o takim samym stopniu zagęszczania (ok. 6) różnice w wartościach temperatury granulatu okazały się statystycznie nieistotne ($p > 0,05$). Prawidłowość taka zachodziła w odniesieniu do wszystkich badanych mieszanin. Należy zaznaczyć, że przy zawartości tłuszczu w mieszaninie wynoszącej 4,14% (5% dodatku rzepaku) – w przypadku wszystkich badanych matryc – nie odnotowano przyrostu temperatury granulatu ponad wartość temperatury materiału po obróbce hydrotermicznej. Tym samym nie dochodziło do zbędnej transformacji energii prasowania na ciepło, powstające w wyniku zbyt dużego tarcia mieszanki w matrycy.

Wytrzymałość kinetyczna granulatu przyjmowała najniższą wartość (84%) w odniesieniu do matrycy o największej średnicy kanału prasującego tj. $S = 5$ mm. Wartość analizowanego parametru była średnio o 6 punktów procentowych niższa od wartości otrzymanych dla pozostałych matryc, w przypadku których zmienność wartości wytrzymałości zachodziła w granicach błędu pomiarowego i była statystycznie nieistotna ($p > 0,05$). Zastosowanie matryc o średnicy kanałów prasujących $S = 3$ i 4 mm pozwalało na uzyskiwanie granulatu o wytrzymałości co najmniej 93%, dla wszystkich poziomów zawartości tłuszczu w materiale.

Najwyższą wartość twardości przyjmował granulaty otrzymany przy użyciu matrycy charakteryzującej się największymi oporami przetłaczania ($S = 4$ mm, $D = 30$ mm). Związane było to zapewne też z większą intensywnością zmian fizykochemicznych, jakie zachodziły w materiale pod wpływem oddziaływania ciepła na takie składniki jak skrobia i białko. Natomiast najniższą twardość otrzymano dla granulatu o najmniejszej średnicy i długości tj. wyprodukowanego na matrycy o parametrach: $S = 3$ mm, $D = 20$ mm. Jednocześnie

zaobserwowano, że wzrost udziału rzepaku w analizowanym przedziale badawczym powodował spadek twardości granulatu przeciętnie o 8%.

Na podstawie wyników pomiarów energochłonności prasowania stwierdzono, że największe zapotrzebowanie na energię prasowania występowało w przypadku matrycy o parametrach: $S = 4$ mm i $D = 30$ mm. Natomiast najniższą wartość tego parametru odnotowano dla matrycy o największej średnicy kanału prasującego tj. $S = 5$ mm. Zwiększenie długości kanału prasującego matrycy o 50% (dla matryc o $S = 4$ mm) powodowało średni wzrost zużycia energii o 8,4%. Z kolei zmiana średnicy otworów matrycy z 3 na 4 mm (dla matryc o $D = 20$ mm) powodowała średnią redukcję energochłonności o 2%, a z 4 na 5 mm (dla matryc o $D = 30$ mm) o 16,5 %. Wzrost zawartości tłuszczu w mieszaninie powodował spadek zapotrzebowania na energię prasowania, przy czym najmniejszą wartość redukcji energochłonności uzyskano dla matrycy o parametrach: $S = 5$ mm, $D = 30$ mm (zmniejszenie o $23 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$); największa wystąpiła w przypadku matrycy $S = 4$ mm, $D = 30$ mm (zmniejszenie o $40 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Warto również podkreślić, że różnice w energochłonności (wynikające ze stosowania poszczególnych matryc) malały wraz ze wzrostem udziału rzepaku. Przykładowo – dla matryc o parametrach: $S = 4$ mm, $D = 30$ mm i $S = 4$ mm, $D = 20$ mm – w przypadku granulowania materiału bez udziału rzepaku różnica wynosiła $19 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, zaś przy 15% udziale rzepaku zmniejszała się do $5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Całkowite zapotrzebowanie na energię granulowania (suma energii elektrycznej i cieplnej) malało wraz ze wzrostem zawartości rzepaku w przedziale do 15%. Najmniejsze wartości odnotowano w przypadku matrycy o średnicy kanałów 5 mm i długości 30 mm. Natomiast zwiększenie udziału rzepaku do 20%, powodowało wzrost wartości analizowanego parametru ze względu na zwiększający się udział energii cieplnej.

W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej, wyznaczono szereg równań regresji opisujących zależność analizowanych parametrów procesu od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą dla różnych parametrów matrycy.

2) Prace nr O2–O4

Efektywność procesu granulowania w znacznej mierze uzależniona jest od właściwego rozdrobnienia surowców wchodzących w skład mieszanki. Rozdrabnianie surowców paszowych wymagane jest zarówno ze względu na wzrost współczynnika strawności pasz, jak też właściwy przebieg procesów technologicznych ich „uszlachetniania” (Ball i in., 2015).

Często przyjmuje się, że wymiar cząstek mieszanki powinien mieścić się poniżej połowy średnicy otworów matrycy. Według innych wymagań, powinien być spełniony warunek przesiewu 100% materiału przez sito ustalone dla danej mieszanki (Laskowski, 1989). Natomiast struktura rozdrobnienia materiału powinna zapewniać zarówno ograniczoną ilość części pylistych, jak też nadmiernie dużych, co szczegółowo przedstawiają Payne i in., (2001).

Z przeglądu literatury wynika, że większość badań zrealizowanych w tym zakresie dotyczy oddziaływania wielkości rozdrobnienia surowca na parametry jakościowe granulatu (Reece i in., 1986; Angulo i in., 1996; Svihus i in., 2004; Rynkiewicz, 2005; Amerah i in., 2007; Cutlip i in., 2008). Natomiast brak jest opracowań dotyczących wpływu tej właściwości na energochłonność procesu, a zwłaszcza na zużycie pary i ciepła. W szczególności brakuje prac, w których zagadnienie wpływu wielkości rozdrobnienia materiału rozpatrywane jest łącznie ze zmianami warunków obróbki hydrotermicznej. Jest to o tyle istotne, że wielkość cząstek materiału odgrywa decydującą rolę w szybkości procesu wymiany ciepła i masy podczas kondycjonowania (Dozier, 2003; Leaver, 2008). Problematyka badawcza związana z wyżej wymienionymi zagadnieniami znalazła odzwierciedlenie w **pracach O2, O3 i O4**.

Publikacja nr O2:

Kulig R., Laskowski J., 2006. Nakłady energii w procesie granulowania śrut pszenicy o różnym stopniu rozdrobnienia. *Motorol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 8A, 187–192.

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu średniego wymiaru cząstek śruty pszenicy oraz warunków obróbki hydrotermicznej na wartość jednostkowych nakładów energii ponoszonych w procesie granulowania.

Wybór surowca podyktowany był tym, że pszenica stanowi cenny składnik pasz stosowanych w żywieniu wszystkich gatunków zwierząt, a zwłaszcza drobiu. W szczególności w mieszankach dla brojlerów, jej zawartość w niektórych przypadkach może wynosić ponad 70% wagowych (Jamroz i in., 2001). W związku z tym, jej większościowy udział decyduje w dużej mierze o właściwościach fizycznych zarówno materiału sypkiego jak też aglomeratu. Z dostępnych badań wynika, że w przypadku mieszanek bazujących na pszenicy, zmiana wielkości rozdrobnienia tego surowca nie wpływa istotnie na pogorszenie się wytrzymałości kinetycznej granulatu (Svihus i in., 2004; Amerah i in., 2007). Problem ten był również analizowany w badaniach własnych (Kulig, 2013b). W doświadczeniu wykorzystano zbilansowaną mieszankę dla brojlerów typu DKA-Grower, w której udział

pszenicy wynosił 73%. W przyjętym zakresie badawczym, większościowy udział pszenicy w granulacie – niezależnie od wielkości jej rozdrobnienia – pozwalał uzyskać produkt o wytrzymałości kinetycznej powyżej 96% oraz akceptowalnej zawartości cząstek rozkruszonych w granulacie (za każdym razem poniżej 4%). Jednocześnie z opublikowanych badań żywieniowych wynika, że w przypadku określonych grup wiekowych brojlerów, zmniejszenie wielkości rozdrobnienia pszenicy nie wpływa negatywnie na efekty żywieniowe (Svihus i in. 2004). Podjęto również próby częściowego zastąpienia w granulacie śruty pszenicy całym ziarnem (Svihus, 2001; Walczyński 2006). Stąd też istnieje realna szansa zmniejszenia energochłonności granulowania poprzez przerabianie surowca o optymalnej wielkości rozdrobnienia – ustalonej ze względu na właściwy przebieg procesu.

W **pracy O2** do badań wykorzystano pszenicę odmiany Emika. Surowiec śrutowano w rozdrabniaczu bijakowym typu H-950 wyposażonym w sita o średnicy otworów 3, 4, 5, 7 i 9 mm. Średni wymiar cząstek surowca (d_{sr}) wynosił odpowiednio: 0,65; 0,83; 1,17; 1,38 i 1,65 mm. Badane materiały przed prasowaniem doprowadzano do pięciu poziomów temperatury (T_k): 50, 60, 70, 80 i 90°C, poprzez obróbkę parą wodną o ciśnieniu 400 kPa. Prasowanie materiału odbywało się z zastosowaniem matrycy o średnicy kanałów prasujących 4 mm i długości 20 mm.

Uzyskane wartości zużycia pary (Z_p) zawierały się w szerokim przedziale od 17,36 do 84,22 kg·Mg⁻¹. Natomiast wartość nakładów energii cieplnej (E_c) wahała się w przedziale od 46,29 do 248,22 kJ·kg⁻¹. Zużycie pary i ciepła zmniejszało się wprost proporcjonalnie do wzrostu wielkości rozdrobnienia śruty poddawanej kondycjonowaniu. Średnia wartość redukcji wielkości tych parametrów wynosiła 18% (dla rozdrobnienia surowca w zakresie od 0,65 do 1,65 mm).

Uzyskane zależności ujęto w postaci liniowych modeli regresji wielokrotnej:

$$Z_p = 27,38d_{sr} + 4,29T_k - 205,45; R^2 = 0,94 \quad (1)$$

$$E_c = 27,19d_{sr} + 4,33T_k - 201,5; R^2 = 0,95 \quad (2)$$

Stwierdzono, że wielkość jednostkowych nakładów energii prasowania materiału (E_p) rosła wraz ze zmniejszaniem się średniego wymiaru cząstek surowca. Największe zmiany wartości tego parametru dotyczyły niskiej temperatury obróbki (50–60°C). Natomiast w przypadku wyższej temperatury materiału po kondycjonowaniu wpływ ten był mniej istotny. Średnie wartości parametru mieściły się w przedziale od 70 do ponad 200 kJ·kg⁻¹. Najwyższe wartości odnosiły się do śruty o najmniejszym średnim wymiarze cząstek (0,65 mm), kondycjonowanej w przedziale temperatury od 50 do 70°C. Taki stan rzeczy

wynikał zapewne z niższych wilgotności materiału po kondycjonowaniu – uzyskiwanych w przypadku materiału o większym rozdrobnieniu – dla którego zużycie pary przyjmowało najniższe wartości. Tak więc, aby ograniczyć deficyt zawartości wody, w tym przypadku należałoby stosować parę „niskociśnieniową”. Związane jest to ze zmniejszaniem się entalpii pary wraz ze spadkiem jej ciśnienia, co powoduje konieczność większego jej zużycia. To z kolei wiąże się z większym stopniem nawilżenia obrabianego materiału (Kulig, 2007, 2008b).

Ilościową ocenę uzyskanych zależności przedstawiono w postaci następującego równania:

$$E_p = -24,95d_{sr} - 2,62T_k + 332,87; R^2 = 0,943 \quad (3)$$

Zapotrzebowanie na całkowitą energię granulowania (E_g) – suma energii elektrycznej prasowania i energii cieplnej pod postacią pary – wahało się w przedziale od 208 do 338 kJ·kg⁻¹. Wartość parametru dla niższej temperatury materiału po kondycjonowaniu (50–60°C), wzrastała wraz ze zwiększaniem się wielkości rozdrobnienia surowca (przeciętnie o 16%). Natomiast w przypadku wyższej temperatury kondycjonowania odnotowano odwrotną tendencję zmian, a wartość parametru ulegała zmniejszeniu średnio o 7%. Najmniejsze wartości energochłonności uzyskano w przypadku granulowania materiału o temperaturze 70°C, przy czym minimalna wartość energochłonności odnosiła się do materiału uzyskanego w wyniku stosowania w rozdrabniaczu sita o średnicy otworów 7 mm.

Równanie regresji wielokrotnej opisujące uzyskane zależności przyjęło następującą postać:

$$E_g = 75,21d_{sr}^2 + 0,118T_k^2 + 2,91d_{sr}T_k - 372,2d_{sr} - 18,14T_k + 998,13; R^2 = 0,942 \quad (4)$$

Wyniki badań przedstawione w **pracy O2** pozwalają zoptymalizować proces granulowania pod kątem doboru takiej wielkości rozdrobnienia ziarna pszenicy, która sprzyja oszczędnościom energii ponoszonej w procesie granulowania. Dodatkowo, mając na uwadze wysoką energochłonność rozdrabniania zbóż (Laskowski i in., 2005; Kalwaj, 2014; Zawislak i in., 2011), zmniejszenie całkowitej energochłonności wytwarzania pasz granulowanych, może w tym przypadku wynikać również z oszczędności zużycia energii ponoszonej na sam proces rozdrabniania materiału paszowego.

Publikacje nr O3 i O4:

Kulig R., Laskowski J., 2008. Energy requirements for pelleting of chosen feed materials with relation to the material coarseness. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*. vol. 8, 115–120.

Kulig R., 2010. Wpływ stopnia rozdrobnienia wybranych surowców roślinnych na właściwości fizyczne materiału przetworzonego w procesie granulowania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, vol. 55 (1), 59–62.

Istotnym warunkiem prawidłowego przebiegu procesu granulowania – ze względu na właściwe rozdrobnienie surowców (obok wcześniej przedstawionych spostrzeżeń) – jest przerabianie materiału o jak najbardziej wyrównanym składzie granulometrycznym (Zawiślak i in., 2014; Vukmirović i in., 2015). Przy czym, według różnych autorów do granulowania najlepiej nadają się surowce o rozdrobnieniu drobnym i średnim, co odpowiada wielkości cząstek w zakresie od 0,4 do 2 mm (Svihus i in., 2004; Franke i Rey, 2006; Rynkiewicz, 2008; Skonecki i Laskowski, 2010).

Stosowanie standardowego systemu rozdrabniania surowców (przy użyciu rozdrabniaczy bijakowych) wiąże się z uzyskiwaniem szerokiego zakresu wymiarów cząstek tworzących daną śrutę. Jednocześnie różnice w uzyskiwanych wartościach pogłębiają się w miarę wzrostu wielkości otworów sit rozdrabniacza (Svihus i in. 2004; Kulig, 2013a). Tymczasem dla właściwej realizacji procesu kondycjonowania, przedział wymiarowy cząstek obrabianego materiału powinien być jak najwęższy. Uzyskanie homogennego materiału – pod względem wielkości tworzących go cząstek – związane jest ze stosowaniem specjalnych technologii rozdrabniania, takich jak: rozdrabnianie dwustopniowe lub rozdrabnianie z wykorzystaniem systemu przesiewającego (Łysiak i Laskowski, 2003; Heimann, 2008). Otrzymywanie stosunkowo wąskiego przedziału wielkości cząstek materiału ogranicza również niekorzystne zjawisko jakim jest rozwarstwianie się i samosegregacja składników mieszanki sypkiej. Zachodzi ono często podczas przemieszczania mieszanki w urządzeniach magazynowych i transportowych linii technologicznej. Wskutek tego może dochodzić do zaburzeń wydajności granulatora, która zmienia się w funkcji składu granulometrycznego przerabianego materiału.

Również z żywieniowego punktu widzenia wyrównany skład granulometryczny cząstek mieszanki w niektórych przypadkach może przynosić lepsze efekty żywieniowe. Przy czym wielkość wymiaru cząstek śruty uzależniona jest zarówno od gatunku, jak też grupy wiekowej zwierząt hodowlanych (Gimeno i in., 2015).

Problematyka badawcza związana z wyżej wymienionymi zagadnieniami została poruszona w **pracach O3 i O4**. Do badań wykorzystano dwa surowce, zdecydowanie różniące się między sobą właściwościami fizycznymi i chemicznymi: surowiec o dużej zawartości skrobi (jęczmień odmiany Edgar) oraz surowiec wysokobiałkowy (lubin odmiany Emir). Surowce te są powszechnie stosowane jako komponenty mieszanek paszowych. Ziarno jęczmienia jest wykorzystywane zarówno w żywieniu drobiu jak i trzody chlewnej, w przypadku której stanowi większościowy udział w pełnoporcjowych mieszankach paszowych. Natomiast nasiona łubinu żółtego mogą być źródłem białka w paszach. Dla niektórych grup wiekowych zwierząt, dopuszczalna ich zawartość może dochodzić do 15% wagowych, stanowiąc tym samym cenny zamiennik śruty sojowej (Grudniewska, 1998; Lamp i in., 2015).

Surowce śrutowano w rozdrabniaczu bijakowym typu H-950 wyposażonym w sita o średnicy oczek w przedziale od 3 do 9 mm. Następnie, z tak przygotowanego surowca wydzielono 5 frakcji o różnej wielkości rozdrobnienia. Rozdzielenia surowca na frakcje dokonano przy pomocy zestawu sit o następujących wymiarach oczek: 0,5; 1,0; 1,6; 2,0 i 3,0 mm. Jako wartość średniego wymiaru cząstek otrzymanych frakcji (d_{sr}) przyjęto średnią arytmetyczną z rozmiaru oczek dwóch sąsiednich sit. Tak więc d_{sr} wynosiło odpowiednio: 0,25; 0,75; 1,3; 1,8 i 2,5 mm. Po rozdrobnieniu materiał badawczy doprowadzano do stałej wilgotności 12%. Proces granulowania prowadzono z zastosowaniem kondycjonowania parowego. Badane surowce przed prasowaniem doprowadzano do pięciu poziomów temperatury (T_k): 50, 60, 70, 80 i 90°C, poprzez obróbkę parą wodną o ciśnieniu 400 kPa. Prasowanie materiału realizowano z zastosowaniem matrycy o średnicy kanałów prasujących 4 mm i długości 20 mm.

Celem **pracy O3** było zbadanie wpływu średniego wymiaru cząstek (dla próbek homogennych wymiarowo) śruty z jęczmienia i łubinu oraz warunków obróbki hydrotermicznej na wartość jednostkowych nakładów energii ponoszonych w procesie granulowania.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że zużycie pary (Z_p) i ciepła (E_c) zwiększało się wprost proporcjonalnie do wzrostu średniego wymiaru frakcji śruty poddawanej kondycjonowaniu (średnio 70%, niezależnie od badanego surowca). Analiza statystyczna wykazała istnienie bardzo wysokiej dodatniej korelacji zarówno pomiędzy zużyciem pary ($r = 0,91$; $p < 0,022$) jak też zużyciem ciepła ($r = 0,93$; $p < 0,023$) a wartością średniego wymiaru cząstek frakcji śruty. Zaobserwowane wartości zużycia pary zawierały się w przedziale od 37,38 do 57,22 kg·Mg⁻¹. Natomiast średnie wartości jednostkowych

nakładów energii cieplnej wahały się od 97,21 do 145,49 kJ·kg⁻¹. Najniższe wartości parametrów odnotowano dla śruty z łubinu i frakcji o najmniejszym średnim wymiarze cząstek (0,25 mm).

Uzyskane zależności ujęto w postaci liniowych modeli regresji wielokrotnej:

dla jęczmienia

$$Z_p = 9,16d_{sr} + 1,43T_k - 59,42; R^2 = 0,965 \quad (5)$$

$$E_c = 11,27d_{sr} + 3,7T_k - 148,05; R^2 = 0,956 \quad (6)$$

dla łubinu

$$Z_p = 4,74d_{sr} + 1,26T_k - 56,68; R^2 = 0,944 \quad (7)$$

$$E_c = 22,43d_{sr} + 3,67T_k - 172,33; R^2 = 0,94 \quad (8)$$

Jednostkowe nakłady energii prasowania materiału (E_p) rosły wraz ze zwiększaniem się wymiarów frakcji śruty (w badanym przedziale zmienności d_{sr} – przeciętnie o 63%). Uzyskane wartości zawierały się w granicach od 77,71 do ponad 125 kJ·kg⁻¹. Największe wartości parametru odnosiły się do jęczmienia i frakcji o największym średnim wymiarze cząstek śruty (2,5 mm). Również w tym przypadku – w odniesieniu do obydwu surowców – stwierdzono występowanie wprost proporcjonalnych zależności pomiędzy średnim wymiarem frakcji śruty a jednostkowymi nakładami energii prasowania.

Ilościową ocenę analizowanych zależności przedstawiono w postaci następujących równań:

dla jęczmienia

$$E_p = 12,01d_{sr} - 1,21T_k + 171,98; R^2 = 0,960 \quad (9)$$

dla łubinu

$$E_p = 9,08d_{sr} - 1,06T_k + 148,65; R^2 = 0,955 \quad (10)$$

Zapotrzebowanie na całkowitą energię granulowania (suma energii elektrycznej prasowania i energii cieplnej zapotrzebowanej pod postacią pary – E_g) wahało się w przedziale od 175,22 do 264,54 kJ·kg⁻¹. Stwierdzono, że w odniesieniu do wszystkich badanych wielkości rozdrobnienia surowców, różnice w energochłonności procesu granulowania – wynikające z właściwości fizykochemicznych analizowanych surowców – pozostają na tym samym poziomie wartości. Tak więc wielkość rozdrobnienia materiału nie niwelowała różnic energochłonności granulowania związanych ze swoistymi właściwościami przerabianych materiałów. Spostrzeżenie to odnosi się również do wcześniej analizowanych parametrów energetycznych.

Równania regresji wielokrotnej opisujące uzyskane zależności przyjęły następującą postać:

dla jęczmienia

$$E_g = 31,53d_{sr} + 2,61T_k + 31,53; R^2 = 0,963 \quad (11)$$

dla łubinu

$$E_g = 23,28d_{sr} + 2,57T_k + 23,78; R^2 = 0,961 \quad (12)$$

Kolejne wyniki badań efektywności procesu granulowania, uzyskane podczas eksperymentu przeprowadzonego w wyżej przedstawionym zakresie, zaprezentowano w **pracy O4**. Celem tej pracy było zbadanie wpływu średniego wymiaru cząstek (dla próbek homogennych wymiarowo) śruty z jęczmienia i łubinu oraz warunków obróbki hydrotermicznej na wartość parametrów fizycznych, charakteryzujących materiał przetwarzany w procesie granulowania.

W przyjętym zakresie badawczym, dla obydwu badanych surowców stwierdzono prawie pełną prostoliniową zależność pomiędzy średnim wymiarem cząstek frakcji (d_{sr}) a wilgotnością materiału po kondycjonowaniu (W_{sr}). Średni przyrost wilgotności (dla 5 wartości temperatury materiału po kondycjonowaniu – T_k), przypadający na jednostkę wielkości rozdrobnienia (1 mm), wynosił 0,61 punktu procentowego dla jęczmienia i 0,95 p.p. dla łubinu. Zarówno najmniejsza (2,62%), jak też największa (5,79%) wartość dotyczyła łubinu. W przypadku tego surowca poziom rozdrobnienia oddziaływał w większym stopniu na dynamikę zmian wilgotności śruty po obróbce hydrotermicznej niż w przypadku jęczmienia.

Uzyskane zależności ujęto w postaci prostoliniowych modeli regresji wielokrotnej:

dla jęczmienia

$$W_{sr} = 0,365d_{sr} + 0,147T_k - 2,682; R^2 = 0,951 \quad (13)$$

dla łubinu

$$W_{sr} = 1,397d_{sr} + 0,049T_k - 1,252; R^2 = 0,953 \quad (14)$$

Wilgotność granulatu po wyjściu z matrycy (W_g) zmniejszała się wraz ze wzrostem wielkości rozdrobnienia surowców. Uzyskane średnie wartości wahały się w przedziale od 9,78 do 15,42%. Wyższą wilgotnością charakteryzował się granulat z jęczmienia. Wynikało to zapewne z faktu, że surowiec ten w większości przypadków odznaczał się wyższą wartością wilgotności po obróbce hydrotermicznej. Przeciętne ubytki wilgotności na skutek prasowania przyjmowały wartość 2,32 punktu procentowego dla jęczmienia i 4,44 p.p. dla łubinu. Podobnie, przyrost temperatury granulatu ponad średnią wartość temperatury

kondycjonowania (70°C), przybierał mniejsze wartości w odniesieniu do jęczmienia niż łubinu. W przypadku granulatu z łubinu, otrzymanego z surowca o średnim wymiarze cząstek w zakresie od 0,75 do 1,8 mm, po wyjściu z matrycy następowała prawie całkowita utrata ilości wody dodanej podczas kondycjonowania. Jednocześnie temperatura granulatu (T_g) osiągała najwyższe wartości.

Ilościową ocenę analizowanych zależności przedstawiono w postaci następujących równań:

dla jęczmienia

$$W_g = -0,440d_{sr}^2 + 2,453d_{sr} + 0,033T_k + 9,641; R^2 = 0,970 \quad (15)$$

$$T_g = 0,973d_{sr}^2 + 0,004T_k^2 + 46,81; R^2 = 0,942 \quad (16)$$

dla łubinu

$$W_g = -0,643d_{sr}^2 + 2,812d_{sr} + 0,045T_k + 2,812; R^2 = 0,883 \quad (17)$$

$$T_g = 0,003T_k^2 + 63,71; R^2 = 0,911 \quad (18)$$

Stwierdzono, że w przypadku śruty z jęczmienia wraz ze zmniejszaniem się wielkości rozdrobnienia surowca, ilość cząstek rozkruszonych w granulacie (C_r) zwiększała się przeciętnie o 6,68 punktu procentowego. Jednocześnie wytrzymałość kinetyczna granulatu (P_{Dr}) zmniejszała się o 5,4 p.p. Natomiast w odniesieniu do łubinu nie stwierdzono statystycznie istotnego wpływu wielkości rozdrobnienia, jak też temperatury materiału po kondycjonowaniu, na wartość powyższych parametrów. Przy czym zaobserwowano, że zawartość cząstek rozkruszonych w granulacie za każdym razem nie przekraczała wartości 4%, a wytrzymałość kinetyczna utrzymywała się na poziomie około 96%. Było to zapewne efektem bardzo wysokiej zawartości białka (38,5%) w tym surowcu. Powyższy fakt wydaje się być również istotnym dla interpretacji wyników badań twardości (T_g) i gęstości granulatu w stanie zsypanym (G_g). Także w tym przypadku oddziaływanie stopnia rozdrobnienia w odniesieniu do łubinu było statystycznie nieistotne. Uzyskana zmienność twardości i gęstości wynikała jedynie ze zmiany temperatury materiału po kondycjonowaniu, przy czym zależności te nie były zbyt silne i wynosiły odpowiednio: $R = 0,598$ i $R = 0,671$. Natomiast w przypadku jęczmienia zmiany wartości rozpatrywanych parametrów były wynikiem oddziaływania wielkości rozdrobnienia. Najniższą wartość twardości (40,03 N·cm⁻¹) stwierdzono dla średniego wymiaru cząstek 1,3 mm. Wartość ta była przeciętnie o 75% niższa od twardości granulatu z łubinu. Z kolei wartość gęstości nasypowej mieściła się w przedziale od 526,8 do 632,2 kg·m⁻³. Najniższa wartość odnosiła się do śruty o średnim

wymiarze cząstek 1,3 mm; najwyższa zaś dotyczyła śruty o największym rozdrobnieniu (0,25 mm).

Uzyskane zależności opisano następującymi równaniami:

dla jęczmienia

$$C_r = 2,927d_{sr} - 0,113T_k + 14,87; R^2 = 0,750 \quad (19)$$

$$P_{DI} = -2,049d_{sr} + 96,78; R^2 = 0,839 \quad (20)$$

$$H_p = 22,32d_{sr}^2 - 60,66d_{sr} + 83,41; R^2 = 0,830 \quad (21)$$

$$G_g = 52,04d_{sr}^2 - 170,3d_{sr} - 1,420T_k + 757,1; R^2 = 0,836 \quad (22)$$

dla łubinu:

$$H_p = 0,593T_k + 124,2; R^2 = 0,358 \quad (23)$$

$$G_g = -2,084T_k + 714,8; R^2 = 0,449 \quad (24)$$

3) Prace nr O5–O7

Podstawowym czynnikiem wpływającym zarówno na jakość granulatu, jak też na przebieg procesu granulowania jest skład surowcowy przerabianego materiału (Kulig i Laskowski, 2005; Zawislak i in., 2010a; Abdollahi i in., 2013b). W praktyce produkcyjnej zastąpienie jednego komponentu mieszanki innym, prowadzi często do uzyskania zupełnie innych wartości parametrów charakteryzujących proces granulowania. Wynika to głównie z różnej podatności surowców na granulowanie, nie mniej ważny jest też zachodzący efekt synergiczny.

Problematyka badawcza związana z oceną wpływu modyfikacji składu surowcowego przetwarzanych materiałów na efektywność procesu granulowania została poruszona w **pracach O5, O6 i O7**. Zagadnienie to znalazło również odzwierciedlenie we wcześniej opisaney **pracy O1**.

Publikacja nr O5:

Kulig R., Laskowski J., 2009. Energy requirements for the pelleting of Broiler Premium Grower diets with a different soybean oil content. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 9, 138–144.

Obniżenie energochłonności procesu prasowania mieszanek paszowych może nastąpić w wyniku modyfikacji ich składu surowcowego, poprzez wprowadzanie komponentów tłuszczowych (Kulig i Laskowski, 2005). Obecność tłuszczu w mieszance nie tylko podnosi wydajność granulatora, ale także zapobiega przestojom związanym z zapychaniem matrycy, co przyczynia się do podnoszenia efektywności produkcji (Corey i in., 2014; Loar i in., 2014).

Jednocześnie w nowoczesnej hodowli, wysoka zawartość tłuszczu w paszach, niezbędna jest w celu dostarczenia zwierzętom energii koniecznej do strawienia dużych ilości białka. Cennym źródłem tłuszczu, ze względu na bardzo wysoką wartość energii metabolicznej jest olej sojowy, co potwierdzają pozytywne wyniki badań żywieniowych (Osek i in. 2001).

W przypadku natłuszczania mieszanek przed granulowaniem, udział zawartego w nich tłuszczu nie powinien jednak powodować utrudnień w uzyskaniu spójnych i twardych granul (Schofield, 2005; Muramatsu i in., 2013). Szczególne działanie destrukcyjne wykazuje tłuszcz dodawany do mieszanki w formie ciekłej. Pokrycie cząstek materiału tłuszczem w postaci „filmu” utrudnia absorpcję ciepła i wody podczas kondycjonowania. W wyniku tego może dojść do obniżenia wytrzymałości produktu, a to generuje straty wydajności procesu na skutek powstawania zbyt dużej ilości cząstek rozkruszonych ponownie zawracanych do przerobu.

Wyniki badań, mających na celu ustalenie zależności pomiędzy zawartością oleju sojowego w mieszankach dla brojlerów typu Grower a energochłonnością procesu granulowania, zaprezentowano w **pracy O6**. Pośrednim celem było także wykazanie różnic, jakie mogą zachodzić w uzyskanych wynikach energochłonności procesu na skutek odnoszenia ich do wydajności granulatora i wydajności końcowej linii granulowania (po ochłodzeniu i odsianiu cząstek rozkruszonych).

Do badań wykorzystano standardową mieszankę Brojler Premium Grower (bazującą na pszenicy) o zmiennej zawartości oleju sojowego (Z_o) w zakresie od 0 do 6% (co 1,5%). Badane surowce przed prasowaniem doprowadzano do temperatury 80°C, poprzez obróbkę parą wodną o ciśnieniu 400 kPa. Prasowanie materiału odbywało się przy wykorzystaniu matrycy o średnicy kanałów prasujących 5 mm i długości 30 mm. Parametry energetyczne procesu granulowania wyznaczono w odniesieniu do wydajności granulatora (określanej bezpośrednio na wyjściu z matrycy granulatora) jak też wydajności linii granulowania, która jest niższa od wcześniej wspomnianej o wielkość wydajności cząstek rozkruszonych (wydzielonych z granulatu podczas jego odsiewania). Znajomość tego parametru pozwala na szacowanie strat wydajności całej linii granulowania, jakie są następstwem ponownego zawracania tych cząstek do prasowania, a tym samym rzeczywistej energochłonności procesu.

Uzyskane średnie wartości zawierały się w przedziale od 1,09 do 7,36% i były silnie dodatnio skorelowane z zawartością oleju sojowego w mieszance. W przypadku zawartości oleju na poziomie 4,5 i 6% ilość cząstek rozkruszonych zawartych w granulacie przekraczała wartość 4%. W związku z tym, dla zawartości oleju wyższych niż 3%, być może należałoby

stosować matrycę o większym stopniu zagęszczenia niż użyta w niniejszych badaniach, co jednak wiązałoby się ze zwiększeniem energochłonności procesu.

Zużycie pary (Z_p) i ciepła (E_c) w analizowanym zakresie badawczym zwiększało się wprost proporcjonalnie do wzrostu zawartości oleju sojowego w mieszance BPG; średnio o 12% w odniesieniu do wydajności granulatora i o 19% w odniesieniu do wydajności linii granulowania. Przeciętne wartości zużycia pary zawierały się w przedziale od 50,98 do 61,43 kg·Mg⁻¹ i były wprost proporcjonalne do zmian zawartości oleju w mieszance. Natomiast średnie wartości jednostkowych nakładów energii cieplnej wahały się w przedziale od 135,41 do 161,23 kJ·kg⁻¹.

Przedstawione powyżej zależności ujęto w postaci prostoliniowych modeli regresji:

dla wydajności granulatora

$$Z_p = 1,028Z_o + 50,97; R^2 = 0,993 \quad (25)$$

$$E_c = 2,505Z_o + 135,69; R^2 = 0,979 \quad (26)$$

dla wydajności linii granulowania

$$Z_p = 1,657Z_o + 51,33; R^2 = 0,997 \quad (27)$$

$$E_c = 4,416Z_o + 136,69; R^2 = 0,984 \quad (28)$$

Średnie wartości energochłonności prasowania (E_p) mieściły się w przedziale od 88,11 do 129,44 kJ·kg⁻¹. Również w tym przypadku – w odniesieniu do obydwu wydajności – stwierdzono występowanie odwrotnie proporcjonalnych zależności pomiędzy zawartością oleju w mieszance a jednostkowymi nakładami energii prasowania. Jednocześnie zawracanie cząstek rozkruszonych do ponownego prasowania powodowało dodatkowy wzrost energochłonności, średnio o 7%. Przy czym różnice w wartościach parametru (odniesione do obydwu wydajności) pogłębiały się w miarę wzrostu udziału oleju w mieszance. Spostrzeżenie to odnosi się również do wcześniej analizowanych parametrów energetycznych.

Ilościową ocenę analizowanych zależności przedstawiono w postaci następujących równań:

dla wydajności granulatora

$$E_p = -6,467Z_o + 123,67; R^2 = 0,944 \quad (29)$$

dla wydajności linii granulowania

$$E_p = -5,589Z_o + 124,97; R^2 = 0,932 \quad (30)$$

Całkowite zapotrzebowanie na energię granulowania (suma energii elektrycznej prasowania i energii cieplnej zapotrzebowanej pod postacią pary) wahało się w przedziale od 237,38 do 265,44 kJ·kg⁻¹. W wyniku analizy otrzymanych danych stwierdzono,

że z praktycznego punktu widzenia – po uwzględnieniu ilości cząstek rozkruszonych w granulacie – całkowita energochłonność granulowania nie zależy istotnie statystycznie ($p > 0,05$) od zawartości oleju w mieszance (przedział zawartości oleju od 1,5 do 6%). Również w przypadku energochłonności odniesionej do wydajności granulatora, zmienność analizowanego parametru dla zawartości oleju w przedziale 1,5–3%, jak też 4,5–6% zachodziła w granicach błędu pomiarowego.

Publikacja nr O6:

Kulig R., Laskowski J., Gawłowski S., 2009. Efektywność granulowania mieszanek paszowych typu DKA Starter i Grower zawierających lniankę. *Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 11, 104–109.

Zwiększenie dopuszczalnej zawartości tłuszczu w materiale przed granulowaniem – ze względu na jego destrukcyjne oddziaływanie na wytrzymałość aglomeratu – zależy istotnie od formy, w jakiej został on wprowadzony do mieszanki, co między innymi wykazano w **pracy O1**. Istotnym zagadnieniem w tym kontekście jest uzyskanie właściwej relacji pomiędzy jakością granulatu a energochłonnością jego wytwarzania. Z kolei, wyniki badań zaprezentowane w **pracy O5** sugerują, że należy poszukiwać surowców które mogłyby być substytutami oleju sojowego w mieszankach. Z przeglądu literatury wynika, że interesującym surowcem oleistym – pozwalającym uzyskać dobre wyniki hodowlane – jest lnianka (Jaśkiewicz i in. 2010). Może ona zastępować inne komponenty mieszanek paszowych, charakteryzujące się wysoką zawartością tłuszczu. Badania przeprowadzone w tym zakresie przedstawiono w **pracy O6**, której celem było określenie wpływu zawartości lnianki na parametry procesu granulowania mieszanek DKA-S i DKA-G.

Do badań wykorzystano po trzy kombinacje każdej z mieszanek, których skład surowcowy bazował na pszenicy. Wszystkie mieszanki zostały zbilansowane pod względem wartości pokarmowej. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polegała na zmianie wzajemnych proporcji lnianki, poekstrakcyjnej śruty sojowej i oleju sojowego (tab.1). Ponadto w składzie mieszanek znajdował się fosforan, kreda, sól pastewna i premiks. Zawartość lnianki zmieniała się w zakresie od 0 do 10%. Mieszanki DKA-S w odróżnieniu od DKA-G, zawierały w swoim składzie mleko w proszku w ilości 5%. W związku z tym (mieszanki wrażliwe na wysokie temperatury) badania przeprowadzono bez udziału pary wodnej, gdyż w takim przypadku oddziaływanie ciepła powinno być ograniczone (Thomas i in., 1997). Natomiast w przerabianych mieszankach stosowano dodatek preparatu zakwaszającego (0,5 kg na

100 kg). W materiałach nie obrabianych hydrotermicznie przed prasowaniem może on pełnić rolę konserwanta, uniemożliwiającego rozwój szkodliwej mikroflory bakteryjnej oraz grzybów (Krekin i in., 2005; Sagan i in., 2011). Badane mieszanki przed prasowaniem doprowadzano do 16% wilgotności.

Tabela 1. Udział głównych komponentów w mieszankach paszowych poddanych granulowaniu

Surowiec	Zawartość surowca w mieszankach DKA-S [%]			Zawartość surowca w mieszankach DKA-G [%]		
	I	II	III	I	II	III
Pszenica	63,2	62,5	60,6	65,4	66,8	67,1
Lnianka	-	5,0	10,0	-	5,0	10,0
Poekstrakcyjna śruta sojowa	24,4	21,1	19,0	23,5	19,6	15,9
Olej sojowy	5,1	3,9	2,8	7,5	5,6	4,1

W przypadku obydwu rodzajów mieszanek, zaobserwowano istotny statystycznie wzrost wartości wytrzymałości kinetycznej granulatu wraz ze zwiększaniem się zawartości lnianki w materiale paszowym. Największą wartością rozpatrywanego parametru charakteryzował się granulat wytworzony z mieszanki DKA-S przy 10% zawartości lnianki (ponad 91%), najmniejszą zaś otrzymany z mieszanki DKA-G przy zerowej zawartości lnianki (72,82%). W przyjętym zakresie badawczym, średni przyrost wytrzymałości wynosił 10,14 punktu procentowego w odniesieniu do mieszanki DKA-S i 13,21 p.p. w przypadku mieszanki DKA-G.

W następstwie zmniejszania się zawartości oleju sojowego w mieszance, na rzecz wzrostu udziału lnianki (której obecność wykazuje mniejsze działanie destrukcyjne odnośnie cech wytrzymałościowych granulatu), dochodziło również do znaczącej redukcji zawartości cząstek rozkruszonych w granulacie. Najwyższe wartości parametru odnosiły się do granulatu otrzymanego z mieszanki DKA-G i były przeciętnie o 11,24 p.p. wyższe niż w przypadku mieszanki DKA-S. Prawdopodobnie zaistniałe różnice w wartościach przynależnych do danego rodzaju mieszanki, wynikały z jednej strony z mniejszej zawartości tłuszczu surowego w mieszankach DKA-S, z drugiej zaś ujawnił się pozytywny wpływ udziału mleka w proszku zawartego tej w mieszance.

Średnie wartości jednostkowych nakładów energii prasowania mieściły się w przedziale od 96,51 do 138,67 kJ·kg⁻¹. Najwyższe wartości parametru dotyczyły mieszanek o najniższej zawartości oleju sojowego. Maksymalna wartość odnosiła się do mieszanki DKA-S

o największym udziale lniarki (10%). Sytuacja taka wynikała zapewne z najniższej zawartości oleju sojowego, który w czasie przetwarzania materiału przez matrycę pozwalał w największym stopniu zredukować wartość oporów tarcia. Drugim czynnikiem zwiększającym energochłonność w tym przypadku, mogła być obecność mleka w proszku, które przyczyniało się do zwiększenia efektu tarcia (Payne i in., 2001). Średni wzrost energochłonności prasowania, na skutek zwiększania się udziału lniarki, przyjmował wartość 13,8% dla mieszanki DKA-S i 26,7% dla mieszanki DKA-G.

Publikacja nr O7:

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.

Tradycyjny skład pełnowartościowych mieszanek paszowych dla drobiu bazuje w głównej mierze na pszenicy i kukurydzy. Tymczasem ze względu na różną dostępność pszenicy na rynku – a także jej cenę – poszukuje się rozwiązań umożliwiających zastępowanie jej innymi surowcami, które jednocześnie nie pogorszą jakości granulatu. W ostatnich latach można zaobserwować zwiększone zainteresowanie wykorzystaniem do tego celu innych zbóż, w tym przede wszystkim nagich form jęczmienia i owsa (Zimonja i in. 2008). Wyniki badań żywieniowych przeprowadzonych w tym zakresie na drobiu i trzodzie chlewnej wskazują, że surowce te użyte w odpowiedniej dawce mogą być w pewnym zakresie substytutem pszenicy (Svihus i Gullord 2002; Kosieradzka i Fabijańska, 2003; Lamp i in. 2015).

Badania efektywności procesu granulowania mieszanek o alternatywnym składzie surowcowym zaprezentowano w **pracy O7**. Celem pracy było określenie wpływu zawartości jęczmienia oplewionego i nagiego oraz owsa nagiego na parametry procesu granulowania mieszanek DKA-S i DKA-G.

Do badań wykorzystano po trzy kombinacje każdej z mieszanek, których skład surowcowy bazował na kukurydzy i poekstrakcyjnej śrucie sojowej. Zasadnicza różnica pomiędzy poszczególnymi mieszankami polegała na zamiennym wykorzystaniu jęczmienia oplewionego, jęczmienia nagiego oraz owsa nagiego (tab. 2).

Badane surowce przed prasowaniem doprowadzano do temperatury 80°C, poprzez obróbkę parą wodną o ciśnieniu 400 kPa. Prasowanie materiału odbywało się przy wykorzystaniu matrycy o średnicy kanałów prasujących 5 mm i długości 30 mm.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że średnie wartości wytrzymałości kinetycznej granulatu wahały się w przedziale od 89,2 do 96,2%, a gęstości w stanie

nasypowym od 536 do 624 kg·m⁻³. W przypadku obydwu parametrów, największe wartości odnosiły się do granulatu wytworzonego z mieszanki DKA-S z udziałem jęczmienia nagego. Najmniejsze zaś dotyczyły produktu otrzymanego z mieszanki DKA-G, zawierającej jęczmień oplewiony.

Tabela 2. Udział procentowy głównych surowców w mieszankach poddawanych granulowaniu

Surowiec	Zawartość surowca w mieszankach DKA-S [%]			Zawartość surowca w mieszankach DKA-G [%]		
	I	II	III	I	II	III
Kukurydza	26	27	27	31	32	32
Poekstrakcyjna śruta sojowa	30,5	30	30	22	22	22
Jęczmień oplewiony	36	-	-	35	-	-
Jęczmień nagi		36	-	-	35	-
Owies nagi		-	36	-	-	35

Dla obydwu przerabianych mieszanek, w przypadku stosowania w nich jęczmienia w formie nagoziarnistej, stwierdzono istotny statystycznie ($p < 0,05$) wzrost wartości wytrzymałości kinetycznej (średnio o 5 punktów procentowych) i gęstości granulatu (średnio o 10%). Sytuacja taka mogła wynikać z wyższej zawartości białka w tym surowcu niż ma to miejsce w formie oplewionej (Szmigiel i Oleksy, 2005). Białko jako naturalne lepiszcze przyczynia się do powstawania trwałych wiązań międzycząsteczkowych, co skutkuje wzrostem wytrzymałości mechanicznej granulatu (Kulig, 2009). Wartości wytrzymałości kinetycznej otrzymane dla granulatu wytworzonego z mieszanek zawierających jęczmień nagi były średnio o 1,5 p. p. wyższe od wartości przynależnych do produktów otrzymanych z mieszanek zawierających owies nagi. Można przypuszczać, że w tym przypadku różnice wynikały z wyższej zawartości tłuszczu w owsie niż w jęczmieniu (Fabijańska i in., 2003; Kordulasińska i Radomska, 2014).

Średnie wartości jednostkowych nakładów energii cieplnej wahały się w przedziale od 71,52 do 85,11 kJ·kg⁻¹. Wykazano, że bardziej wrażliwą na zmiany wartości analizowanego parametru była mieszanka DKA-S. Przy czym najwyższe wartości parametru uzyskano w odniesieniu do mieszanek zawierających jęczmień oplewiony. Natomiast średnie jednostkowe nakłady energii prasowania mieściły się w przedziale od 56,81 do 89,72 kJ·kg⁻¹. Największa wartość parametru odnosiła się do mieszanki DKA-S, zawierającej w składzie owies nagi. Sytuacja taka wynikała prawdopodobnie z faktu, że materiał ten charakteryzował się najniższym nawilżeniem po kondycjonowaniu (najniższa wartość zużycia pary wodnej

w celu osiągnięcia temperatury 80°C). W konsekwencji skutkowało to tym, że w czasie przetłaczania materiału przez otwory matrycy w najmniejszym stopniu zachodziła redukcja wartości oporów tarcia. Z kolei, rozpatrując proces pod kątem energochłonności całkowitej (suma energii cieplnej i elektrycznej prasowania), stwierdzono, że średnie nakłady energii granulowania mieściły się w przedziale od 135,82 do 140,54 kJ·kg⁻¹ (w odniesieniu do mieszanek typu DKA) oraz od 149,33 do 160,52 kJ·kg⁻¹ (w odniesieniu do mieszanek typu DKA-G). Najniższe wartości za każdym razem dotyczyły mieszanek zawierających w składzie jęczmień w formie oplewionej. Decydującym czynnikiem w tym przypadku było prawdopodobnie uzyskiwanie przez te mieszanki największej wilgotności podczas kondycjonowania, co pozwalało w największym stopniu zredukować wartość oporów tarcia i tym samym zmniejszyć energochłonność prasowania. Tak więc można przypuszczać, że w przypadku pozostałych mieszanek, zmniejszenie energochłonności mogłoby nastąpić na skutek stosowania pary o niższym ciśnieniu, jak to wcześniej wyjaśniono podczas interpretacji wyników badań przedstawionych w **pracy O2**.

Uzyskane wyniki badań, zaprezentowane w **pracy O7**, wykazały możliwość kształtowania właściwości wytrzymałościowych granulatu poprzez zmianę składu surowcowego mieszanek paszowych. Dodatkowo potwierdziły przydatność analizowanych surowców jako substytutów pszenicy w mieszankach poddawanych granulowaniu. W szczególności udział nagich form jęczmienia i owsa pozwalał uzyskać granulaty o wysokiej wytrzymałości kinetycznej (>94%) i gęstości nasypowej ok. 600 kg·m⁻³ oraz akceptowalnej wielkości całkowitych nakładów energii granulowania (średnio 146 kJ·kg⁻¹).

4) Prace nr O8–O9

„Doskonałość praktyki granulowania” wynika bezpośrednio z prac eksperymentalnych, mających na celu poprawę jakości granulatu, wydajności czy efektywności energetycznej poprzez wybór odpowiednich, możliwych do regulacji (zmiany) parametrów determinujących przebieg procesu, co zaprezentowano w **pracach O1–O7**. Znając zachodzące korelacje można uzyskane wyniki traktować jako punkt wyjścia do podejmowania działań optymalizacyjnych. Stąd też dalsze badania nad poszukiwaniem zależności pomiędzy jakością granulatu, parametrami procesu i zużyciem energii powinny być kontynuowane, czasami jednak mogą być trudne do uogólnienia, co uzależnione jest od parametrów technicznych danego systemu i zakresu prowadzonych badań. W związku z tym,

istotnym elementem prac badawczych (prowadzonych w kontekście efektywności granulowania) jest próba wyjaśnienia przebiegu procesu w oparciu o badania modelowe, co umożliwia porównywanie otrzymanych wyników badań z innymi pracami, jak też daje możliwość ich bezpośredniego wykorzystania przez innych badaczy (Denny, 2002; Czaban i Kamiński, 2012; Mani i in., 2004; Shankar i in., 2007, 2008). Problematyka badawcza związana z wyżej wymienionym zagadnieniem została poruszona w **pracach O8 i O9**.

Publikacja nr O8:

Skonecki S., **Kulig R.**, Łysiak G., 2014. Models of pressure compaction and their application for wheat meal. *International Agrophysics*, 28 (1), 125–130.

Badania własne wskazały, że proces ciśnieniowego zagęszczania (prasowania) materiałów biologicznych w komorze zamkniętej stanowi podstawę opisu zjawisk towarzyszących granulowaniu i umożliwia pełną charakterystykę procesu i produktu. Ważne przy tym jest określenie zależności między gęstością materiału i naciskiem podczas prasowania oraz późniejsze zachowanie po wyjęciu z matrycy.

Badania związane z modelowaniem procesu (wyznaczenie zależności pomiędzy gęstością a naciskiem zagęszczającym) pozwalają zrozumieć zachowanie rozdrobnionego materiału podczas aglomerowania i służą optymalizacji ciśnienia potrzebnego do uzyskania aglomeratu o wymaganych właściwościach (Denny, 2002; Mani i in., 2004; Skonecki, 2004; Czaban i Kamiński, 2012). Stosowane w analizie procesu zagęszczania materiałów biologicznych różne modele empiryczne i teoretyczne nie wyjaśniają w pełni mechanizmu procesu zagęszczania, którego znajomość niezbędna jest między innymi do określenia zmiany stanu materiału w procesie granulowania (Tabil i Sokhansanj, 1996a, 1996b; Mani i in., 2004; Adapa i in., 2009). Wynika to w głównej mierze z tego, że materiały pochodzenia roślinnego wykazują zmienność cech fizycznych ze zmianą warunków technologicznych, takich jak wilgotność czy temperatura. Stąd też złożoność cech tych materiałów jest przyczyną znacznych trudności przy modelowaniu procesu zagęszczania.

W wyniku badań i rozważań teoretycznych nad zagęszczaniem różnorodnych materiałów powstało kilkadziesiąt typów równań zagęszczania. Należy przy tym zaznaczyć, że problem zagęszczania materiałów może być analizowany przez rozpatrywanie objętości właściwej materiału V stosując podstawową relację:

$$dP = -K \frac{dV}{V} \quad (31)$$

gdzie: P – nacisk jednostkowy, V – objętość właściwa materiału, K – moduł ściśliwości objętościowej.

Celem **pracy O8** było przedstawienie modeli (równań) stosowanych do opisu przebiegu procesu zagęszczania różnych materiałów oraz dokonanie oceny ich zastosowania dla materiałów paszowych na przykładzie zagęszczania rozdrobnionej pszenicy.

Do badań zagęszczania wykorzystano prasę ZD 40 i zespół prasujący z matrycą zamkniętą. Analizie poddano modele zagęszczania Faborode i O'Callaghana (1986), Ferrero i in. (1991), Kawakity i Ludnego (1970), Heckela (1961) oraz Lordiego i in. (1997). Obliczono parametry równań modeli dla zagęszczania pszenicy o wilgotności 10–18% (co $2 \pm 0,2\%$) oraz wyznaczono zależności pomiędzy tymi parametrami a wilgotnością materiału.

Przeprowadzona analiza wybranych modeli zagęszczania wykazała, że z różną dokładnością opisują one ciśnieniowe zagęszczanie ziarnistego materiału roślinnego, a dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych zależy od wilgotności materiału. Z kolei, ocena wpływu wilgotności na parametry równań zagęszczania wskazała, że wpływ ten można opisać równaniem liniowym.

Modele Lordiego i in., Heckela oraz Faborode i O'Callaghana dobrze opisywały dane eksperymentalne (wysokie współczynniki determinacji), jednak niektóre parametry równań charakteryzujące np. cechy materiałowe różniły się od danych doświadczalnych. W przypadku modelu Kawakity i Ludnego występowały znaczne różnice pomiędzy wartościami obliczonymi z modelu a eksperymentalnymi.

W przypadku modelu Ferrero i in. jego przydatność wynikała zarówno z dobrego opisu danych eksperymentalnych jak też parametrów równania zagęszczania A , B i C . Parametry te odzwierciedlały fizyczne zjawiska występujące w zagęszczanym materiale, a mianowicie:

- A , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ – przedstawiało maksymalną hipotetyczną zmianę gęstości podczas rozładowywania (rozprężanie się aglomeratu). W rzeczywistości, jak wykazały badania, gęstość rzeczywista aglomeratu była trochę mniejsza niż $\rho_o + A$;
- B , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ – odzwierciedlało sprężystość pozorną materiału. Wyrażenie $B \cdot \rho_o^{-1}$ określono jako ściśliwość materiału;

- C , MPa^{-1} – wyrażało głównie proporcję wzrostu gęstości dla fazy zagęszczania. Malało ze wzrostem nacisku. Iloczyn $A \cdot C$ przedstawiał nachylenie krzywej dla nacisku jednostkowego $P = 0$, ($A \cdot C \cdot \rho_0^{-1}$ – początkowa ściśliwość).

Zagęszczanie ziarnistego materiału roślinnego zgodnie z modelem Ferrero i in. może być podzielone na charakterystyczne fazy, związane ze zmianami struktury materiału. Wzrost wilgotności wywoływał większy przyrost gęstości surowca w początkowej fazie (deformacja początkowa i główne zagęszczenie) niż w fazie końcowej (liniowa część krzywej zagęszczania). O zakresie wzrostu gęstości informowały parametry A i C równania zagęszczania. W końcowej fazie zagęszczania występował niewielki wzrost gęstości przy dużym wzroście nacisku (zależność była liniowa, współczynnik proporcjonalności B charakteryzował sprężystość materiału). Stwierdzono, że zależności parametrów A , B , C równania zagęszczania od wilgotności można opisać związkami liniowymi.

Badania wpływu wilgotności rozdrobnionej pszenicy na parametry wybranych modeli zagęszczania wykazały, że do opisu zachowania materiałów roślinnych (paszowych) podczas zagęszczania można przyjąć model Ferrero i in. Przedstawione informacje dla zależności pomiędzy gęstością i naciskiem charakteryzowały przebieg aglomerowania ziarnistych materiałów roślinnych.

Publikacja nr O9:

Kulig R., Łysiak G., Skonecki S., 2015. Prediction of pelleting outcomes based on moisture versus strain hysteresis during the loading of individual pea seeds. *Biosystems Engineering*, 129 (1), 226–236.

Podczas procesu granulowania cząstki materiału zagęszczanego podlegają wstępnej preorientacji, pękaniu i/lub plastycznym odkształceniom, upakowaniu i tworzeniu wiązań międzycząsteczkowych (faza zagęszczania) a następnie konsolidacji i odkształceniom sprężystym (Jain, 1999). Plastyczność, jako podatność materiału dla trwałego odkształcania pod wpływem zewnętrznej siły, jest jedną z ważnych i pożądanych właściwości materiału – niezbędnych dla wzrostu powierzchni styku pomiędzy cząsteczkami – zatem ważną dla technologii aglomerowania, gdzie wymagane jest zastosowanie wysokich ciśnień. Praca mechaniczna zagęszczania wykonana na materiale plastycznym nie jest tracona na odwracalne odkształcenia a odkształcenia trwałe, powodując mniejsze lokalne spiętrzenia naprężeń i tym samym tworząc cząstki bardziej odporne na kruche pękanie.

Chociaż znaczenie plastyczności materiału jest dobrze poznane w praktyce zagęszczania, większość prac eksperymentalnych bazuje na badaniach zachowania cząstek w matrycy zamkniętej. Zachowanie materiału zagęszczanego w takich warunkach może być modyfikowane w szerokim zakresie poprzez zmianę wilgotności, czy też substancji zwiększających lub zmniejszających tarcie. Jakkolwiek dobór odpowiedniego zabiegu zależy musi od właściwości samych cząstek. Brak jest jednak badań łączących właściwości pojedynczych cząstek z przebiegiem procesu zagęszczania.

Biorąc pod uwagę powyższe, celem badań zrealizowanych w **pracy O9** było poszukiwanie związków pomiędzy właściwościami określonymi w teście histerezy odkształceń a wynikami procesu granulowania.

Test histerezy pozwala na wyrażenie udziału odkształceń trwałych i sprężystych podczas obciążania próbki materiału. Ponadto poprzez wyrażenie wydatku pracy trwałej i sprężystej zrealizowane badania stanowią próbę zastąpienia specyficznych warunków zagęszczania (wilgotności) na grunt bardziej ogólnej mechaniki klasycznej.

W badaniach wykorzystano nasiona grochu o zróżnicowanych właściwościach lepko-sprężystych wynikających ze zmiennej zawartości wody. Dla pojedynczych nasion, przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S określono udział energii oraz odkształceń trwałych i sprężystych. Rozdrobniony groch poddano równocześnie granulowaniu oceniając jednostkowe zużycie energii prasowania i cechy jakościowe uzyskanego granulatu, takie jak wytrzymałość w teście brazylijskim (Li i in., 2000), wytrzymałość kinetyczną, gęstość i udział frakcji rozkruszonej.

Potwierdzono istotne zależności pomiędzy wynikami procesu granulowania a wilgotnością i wynikami testu histerezy pojedynczych nasion grochu. Jednocześnie wykazano, że oddziaływanie plastyczności nasion i wilgotności na parametry granulowania prowadzą do wyraźnie odmiennych wniosków. Nakłady energii prasowania spadały prostoliniowo wraz ze zwiększaniem wilgotności. Również gęstość w stanie zsypanym i wytrzymałość granulatu spadały proporcjonalnie do wzrostu wilgotności. Jedynie dla wytrzymałości kinetycznej obserwowano lokalne maksimum dla 16% udziału wody. W przeciwieństwie do powyższych, wzrost plastyczności nasion powodował spadek wartości wszystkich analizowanych parametrów procesu granulowania. Wielkość tych zmian wzrastała bardzo szybko kiedy udział odkształceń plastycznych przekraczał poziom 90%. Wskazuje to, że bardziej miękki i plastyczny materiał plus dodatkowy efekt smarujący, wynikający ze zwiększonego udziału wody, ułatwiają proces wytłaczania granulatu, czyniąc proces mniej energochłonnym. Z drugiej jednak strony, siły odpowiedzialne za tworzenie aglomeratu dla

wyższych poziomów wilgotności nie są na tyle duże aby produkt finalny posiadał odpowiednią gęstość i wytrzymałość.

Nieproporcjonalny i wyraźny spadek „efektywności” granulowania wskazuje, że plastyczność materiału może stanowić kluczowy czynnik konieczny do uwzględnienia na drodze do optymalizacji przebiegu procesu granulowania. W tym kontekście wskazano na konieczność wyróżnienia uplastyczniającego oddziaływania wody od efektu zmniejszającego tarcie i wpływającego na tworzenie wiązań międzycząsteczkowych.

W oparciu o uzyskane wyniki zaproponowano nowy empiryczny model wiążący właściwości materiału z wynikami procesu granulowania. Model okazał się być bardzo dokładny dla szacowania nakładów energii granulowania oraz gęstości granulatu dla nasion różniących się udziałem odkształceń plastycznych. W tym temacie należy dodać, że bardzo zróżnicowane właściwości granulowanych surowców pochodzenia roślinnego i ich indywidualne oddziaływanie z wodą stwarzają ogromne trudności interpretacji wyników. Zastąpienie tej reakcji właściwościami lepko-sprężystymi stwarza nowy obszar poszukiwań badawczych o bardziej ogólnym i naukowym znaczeniu.

4.6. PODSUMOWANIE

Przedstawione i opisane – w cyklu publikacji powiązanych tematycznie – oddziaływanie szeregu czynników na efektywność procesu granulowania (punkt 4.3.) podkreśla konieczność uwzględnienia skomplikowanych interakcji i synergii występujących pomiędzy wieloma zmiennymi procesu. Stąd też, doskonalenie procesu aglomerowania ciśnieniowego materiałów biologicznych, zwłaszcza w obszarze dotyczącym technologii produkcji pasz granulowanych, jest ciągle możliwe i zarazem konieczne.

Wymuszane współczesną praktyką częste zmiany w systemie materiał-proces-produkt wymagają ciągłych badań eksperymentalnych. Do dnia dzisiejszego nie ma narzędzi, które pozwoliłyby na optymalizację parametrów procesu w wyniku zaistnienia zmian w/w systemie. „Doskonałość procesu granulowania” nadal wynika bezpośrednio z prac eksperymentalnych, mających na celu poprawę jakości granulatu, wydajności czy efektywności energetycznej poprzez wybór prostych lub możliwych do regulacji (zmiany) parametrów realizacji procesu takich, jak: wilgotność, temperatura, ciśnienie pary, czas przebywania materiału w kondycjonerze czy granulatorze, parametry matrycy itd. W tym sensie wyniki badań przedstawione głównie w pracach **O1–O7** mają praktyczne i poznawcze

znaczenie. Wskazują również, wbrew istniejącym opiniom, że w wielu przypadkach wzrost efektywności energetycznej i trwałości mechanicznej granulatu nie wykluczają się wzajemnie. Akceptowalna jakość produktu gotowego mieści się zwykle w pewnym przedziale zmienności czynników, które o niej decydują. Jednocześnie, posiadając odpowiednie informacje, możliwe jest takie manipulowanie wartością czynników wpływających na przebieg procesu, aby uzyskać produkt o jak najwyższej jakości przy zachowaniu zużycia energii na możliwie najniższym poziomie.

Konieczna jest jednak analiza przebiegu całego procesu, a nie jego pojedynczych aspektów, bo wtedy nie otrzymuje się pełnego obrazu wzajemnych zależności. Wyniki oddziaływania parametrów matrycy, wymiarów cząstek, obróbki termicznej czy właściwości surowców w każdym przypadku wskazują na występujące wzajemne zależności. Średnica i długość kanałów prasujących matrycy istotnie wpływają na energochłonność granulowania i parametry jakościowe granulatu. Jednakże zmiany powyższych w znacznej mierze uzależnione są od właściwości (składu surowcowego) materiału. Mniejsze wielkości cząstek powodowały proporcjonalny spadek zużycia energii cieplnej, a jednocześnie wzrost energii granulowania. Z kolei, całkowite nakłady energii ponoszone w procesie, jako suma energii cieplnej i elektrycznej prasowania, zmniejszały się lub zwiększały w zależności o temperatury kondycjonowania. Stąd też, możliwe jest doskonalenie efektywności energetycznej procesu granulowania poprzez właściwy dobór stopnia rozdrobnienia granulowanego materiału. Samo zmniejszenie całkowitej energochłonności wytwarzania pasz granulowanych, może w tym przypadku wynikać również z oszczędności energii ponoszonej na proces rozdrabniania materiału paszowego. Oczywiście jak wspomniano zakres wymiarowy cząstek bywa wyznaczany również przez inne istotne czynniki, jak np. żywieniowe. W ocenie oddziaływania stopnia rozdrobnienia na proces granulowania, badania powinny zmierzać do oceny efektywności kondycjonowania i prasowania niezależnie (powyższe uwzględniono w badaniach własnych). Interesujące w tym zakresie są badania, które dotyczą homogenności wymiarowej cząstek granulowanych surowców. Wyniki oddziaływania warunków obróbki hydrotermicznej wskazują, że nakłady energii cieplnej w procesie granulowania dorównują pracy mechanicznej prasowania. Podkreślają one jednocześnie dużą zmienność zarówno całkowitych nakładów energii oraz cech jakościowych granulatu w zależności od warunków jej prowadzenia. Badania przeprowadzone na nasionach grochu (brak obróbki termicznej), wskazują że możliwa i konieczna jest racjonalizacja (wartościowanie) wyników kondycjonowania termicznego z punktu widzenia samego formowania aglomeratu.

Przedstawione w pracach **O1-O7** korelacje pomiędzy determinantami przebiegu procesu a jego wynikami oraz wskazane tendencje i wielkości zmian parametrów procesu mogą być podstawą podejmowania działań optymalizacyjnych. Trzeba jednak podkreślić, że chociaż dalsze badania nad poszukiwaniem zależności pomiędzy jakością granulatu, parametrami procesu i zużyciem energii powinny być kontynuowane, najczęściej pozostają one ważne dla specyficznego urządzenia czy systemu, często zatem posiadają mniejsze znaczenie w sensie ogólnym. Innymi słowy, dopóki w pracach tych brakuje możliwości lub próby wyjaśnienia przebiegu procesu, wyniki ich będą bardzo trudne do porównania z innymi pracami lub do bezpośredniego wykorzystania przez innych badaczy.

Warunkiem powyższego jest przeniesienie oddziaływania zróżnicowanych czynników istotnych w procesie granulowania, jak wilgotności, temperatury, czasu obróbki czy składu chemicznego, na właściwości samych cząstek mieszaniny, ich wzajemne oddziaływanie i właściwości masy ziarnowej. Krokiem w tym kierunku są badania podjęte w pracy (**O9**) dążące do uwzględnienia w opisie procesu granulowania właściwości mechanicznych cząstek. Jednakże problem jest niezwykle skomplikowany gdyż w procesie granulowania mamy do czynienia z mieszaniną cząstek o różnych właściwościach geometrycznych i mechanicznych. Stąd też, przełożenie zachowania pojedynczej cząstki na zachowanie masy ziarnowej stanowi nadal istotny problem. Dlatego też, z praktycznego punktu widzenia większość badań modelowych bazuje na zachowaniu masy ziarnowej i jej właściwościach.

Trzeba podkreślić brak istotnych wyników badań związków pomiędzy właściwościami pojedynczych cząstek a zachowaniem masy ziarnowej. W związku z tym istnieje kolejny, nawiązujący do badań zaprezentowanych w pracy, a zarazem bardzo szeroki obszar badawczy. Bardzo interesujące w tym zakresie będzie zastosowanie współczesnych metod projektowania procesów, jak metoda elementów skończonych, metoda elementów dyskretnych itp. Ponadto, rozwój i aplikacja tych metod wymaga kontynuacji podjętych w pracy badań nad opisem właściwości i zachowania pojedynczych cząstek.

Wyniki uzyskane w pracy **O9** wykazały wyraźne zmiany parametrów procesu granulowania w zakresie niewielkiej zmiany plastyczności cząstek (w wysokim zakresie wartości tej cechy). Stąd też bierze się wspomniana konieczność wyróżnienia uplastyczniającego oddziaływania wody od efektu zmniejszającego tarcie i wpływającego na tworzenie wiązań międzycząsteczkowych. W tym zakresie dalsze prace muszą zmierzać w kierunku wyznaczenia kolejnego istotnego w procesie granulowania parametru jakim jest lepkość. Bardzo obiecujące w tym zakresie będą badania cech reologicznych materiałów

(np. przy wykorzystaniu testu relaksacji lub pełzania). Lepkość, jako kolejna niezależna i dobrze rozpoznana na gruncie mechaniki klasycznej wielkość fizyczna, będzie istotnym parametrem do uwzględnienia w bardziej ogólnym modelu procesu granulowania. Zmiana właściwości mechanicznych cząstek i zachowania mieszaniny ziarnowej powinna być podstawowym kryterium w ocenie wspomnianego oddziaływania warunków obróbki hydrotermicznej.

Analiza modeli procesu granulowania przedstawiona w pracy **O8** wskazała, że dokładność modeli, a zarazem wartości stałych w nich zawartych, zależą od właściwości materiałów. W tym znaczeniu istotne będzie poszukiwanie związków pomiędzy parametrami takich modeli a właściwościami mechanicznymi materiałów, na które wskazano w pracy **O9** i innych oraz wnioskach z nich wynikających. Dalsze badania w tym zakresie warunkują zastosowanie w projektowaniu procesu granulowania modeli z jednoczesnym uwzględnieniem właściwości mechanicznych materiałów.

Uwzględniając różnorodność właściwości granulowanych materiałów (nawet ograniczając się do materiałów pochodzenia roślinnego) próba uwzględnienia w modelu granulowania niezależnych wielkości mechanicznych, opisujących stan granulowanego medium, stanowi ważny element w modelowaniu procesu. Lepsze poznanie mechanizmów przebiegu procesu i ich dokładniejszy opis wymagają dalszych prac w podjętym kierunku. Z praktycznego punktu widzenia kontynuowanie badań pozwoli na dostarczenie projektantom urządzeń i procesów granulowania dokładniejszych i bardziej uniwersalnych narzędzi.

4.6. LITERATURA

- 1 **Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V., 2011.** Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Animal Feed Science and Technology*, 168, 88–99.
- 2 **Abdollahi M. R., Ravindran V., 2013a.** Influence of pellet length on pellet quality and performance of broiler starters. *Journal of Applied Poultry Research*, 22, 516–522.
- 3 **Abdollahi M.R., Ravindran V., Svihus B., 2013b.** Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Animal Feed Science and Technology*, 179, 1–23.
- 4 **Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V., 2013c.** The effect of manipulation of pellet size (diameter and length) on pellet quality and performance, apparent metabolisable energy and ileal nutrient digestibility in broilers fed maize-based diets. *Animal Production Science*, 53, 114–120.
- 5 **Angulo E., Brufau J., Esteve-Garcia E., 1996.** Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing in particle size and in broiler starter and finisher diets. *Animal Feed Science and Technology*, 63, 25–34.

- 6 **Amerah A.M., Ravindran V., Lentle R.G., Thomas D.G., 2007.** Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilisation, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poultry Science*, 86, 2615–2623.
- 7 **Adapa P., Tabil L., Schoenau G., 2009.** Compression Characteristics of Selected Ground Agricultural Biomass, *Agricultural Engineering International: CIGR E-journal*, Manuscript 1347, Vol. XI.
- 8 **Ball M.E.E., Magowan E., McCracken K.J., Beattie V.E., Bradford R., Thompson A., Gordon F.J., 2015.** An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. *Livestock Science*, 173, 48–54.
- 9 **Buchanan N. P., Lilly K. G. S., Gehring C. K., Moritz J. S., 2010.** The effects of altering diet formulation and manufacturing technique on pellet quality. *Journal of Applied Poultry Research*, 19, 112–120.
- 10 **Cerrate S., Wang Z., Coto C., Yan F., Waldroup P. W., 2009.** Effect of pellet diameter in broiler starter diets on subsequent performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 18, 590–597.
- 11 **Chadwick D.T., McDonnell K.P., Brennan L.P., Fagan C.C., Everard C.D., 2014.** Evaluation of infrared techniques for the assessment of biomass and biofuel quality parameters and conversion technology processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 672–681.
- 12 **Chewning C. G., Stark C. R., Brake J., 2012.** Effects of particle size and feed form on broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 21, 830–837.
- 13 **Corey A.M., Wamsley K. G. S., Winowski T. S., Moritz J. S., 2014.** Effects of calcium lignosulfonate, mixer-added fat, and feed form on feed manufacture and broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 23, 418–428.
- 14 **Corzo A., Mejia L., Loar R. E., 2011.** Effect of pellet quality on various broiler production parameters. *Journal of Applied Poultry Research*, 20, 68–74.
- 15 **Cutlip S.E., Hott J. M., Buchanan N. P., Rack A. L., Latshaw J. D., Moritz J.S., 2008.** The Effect of Steam-Conditioning Practices on Pellet Quality and Growing Broiler Nutritional Value. *Journal of Applied Poultry Research*, 17, 249–261.
- 16 **Czaban J., Kamiński Z., 2012.** Teoretyczne podstawy zagęszczania i prasowania materiałów sypkich pochodzenia roślinnego o cechach plastycznych. *Acta Agrophysica*, 19(3), 487–500.
- 17 **Deming W.E., 1996.** Out of the Crisis. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, Massachusetts.
- 18 **Denny, P. J., 2002.** Compaction Equations: A Comparison of the Heckel and Kawakita Equations. *Powder Technology*, 127, 162–172.
- 19 **Dozier W.A., 2003.** Optimising the conditioning process. *Feed Manager*, 54, 23–27.
- 20 **Fabijańska M., Kosieradzka I., Bekta M., 2003.** Owies nagi w żywieniu trzody chlewnej i drobiu Część I. Owies nagi w żywieniu tuczników. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 229, 317–328.
- 21 **Fairchild F. J., 2014.** Components of the pelleting system. *World Grain*, 32 (2), 86–89.
- 22 **Faborode M. O. and O’Callaghan J. R., 1986.** Theoretical Analysis of the Compression of Fibrous Agricultural Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35, 175–191.
- 23 **Ferrero A., Horabik J., and Molenda M., 1991.** Density-pressure relationships in compaction of straw. *Canadian Agricultural Engineering*, 33, 107–111.
- 24 **Franke M., Rey A., 2006.** Pelleting quality. *World Grain*, May 78–79.
- 25 **Frączek, J. (red.), 2010.** Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne. PTIR, Kraków.
- 26 **Gimenoa A., AlAlamia A., Toralb P.G., Frutosb P., Abeciac L., Fondevila M., Castrillo C., 2015.** Effect of grinding or pelleting high grain maize-or barley-based concentrates on rumen environment and microbiota of beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 203, 67–78.
- 27 **Grudniewska B., 1998.** Hodowla i użytkowanie świń. Wyd. ART, Olsztyn.
- 28 **Heckel R. W., 1961.** Density – pressure relationships in powder compaction. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 221, 671–675.
- 29 **Heimann M., 2008.** Advantages and disadvantages in particle reduction techniques. 16th Annual ASA-IM SEA Feed Technology and Nutrition Workshop, The Regent Singapore, May 26–30.
- 30 **Hejft R., 2012.** Granulowanie pasz w układzie roboczym z płaską matrycą - formowanie granulatu w otworze – część I. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (139), 81–90.
- 31 **Hejft R., Obidziński, S., 2015.** Innowacje w konstrukcji granulatorów do materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 1(153), 57–66.
- 32 **Jain S., 1999.** Mechanical properties of powders for compaction and tableting: an overview. *Pharmaceutical Science and Technology Today*, 2(1), 20–31.
- 33 **Jamroz D., Podkówka W., Chachulowa J., 2001.** Żywnienie zwierząt i paszoznawstwo. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- 34 **Jaśkiewicz T., Puzio I., Sagan A., 2010.** The effects of dietary supplementation with cla and *Camelina sativa* seeds oil on performance of broiler chickens. *Acta Scientiarum Polonorum. Medicina Veterinaria*, 9 (4), 11-19.
- 35 **Kaliyan N., Morey V.R., 2009.** Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33, 337-359.
- 36 **Kawalaj J., 2014.** Wpływ parametrów sita rozdrabniacza bijakowego na efektywność jego pracy. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 53 (2), 084-085.
- 37 **Kawakita K. and Ludde K. H., 1970.** Some considerations of powder compression equations. *Powder Technology*, 4, 61-68.
- 38 **Kordulasińska I., Bulińska-Radowska Z., 2014.** Ocena cech morfologicznych, użytkowych i składu chemicznego obiektów owsa zgromadzonych w Krajowym Centrum Roślinnych Zasobów Genowych w Radzikowie. *Polish Journal of Agronomy*, 16, 3-12.
- 39 **Kosieradzka I., Fabijańska M., 2003.** Owies nagi w żywieniu trzody chlewnej i drobiu Część II. Owies nagi w żywieniu kurcząt brojlerów. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 229, 329-339.
- 40 **Krekin A., Jaśkiewicz T., Rubaj J., Natyka S., 2005.** Wpływ udziału kwasu ortofosforowego w mieszankach paszowych na wyniki odchowu kurcząt brojlerów. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Sectio EE Zootechnica*, 23, 355-361.
- 41 **Kulig R., 2007.** Steam and heat consumption during conditioning of vegetable feed raw materials in the pelleting process. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 7A, 59-67.
- 42 **Kulig R., 2008a.** Określenie zależności między parametrami procesu kondycjonowania materiałów roślinnych a gęstością granulatu. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 53 (3), 156-160.
- 43 **Kulig R., 2008b.** Wpływ warunków kondycjonowania na wilgotność materiału sypkiego i granulatu. *Acta Agrophysica*, 12(3), 737-745.
- 44 **Kulig R., 2009.** Wpływ procesu kondycjonowania wybranych surowców strączkowych na właściwości fizyczne granulatu. *Inżynieria Rolnicza* 1(110), 147-154.
- 45 **Kulig R., 2013a.** Wpływ stopnia rozdrobnienia ziarna pszenicy na efektywność granulowania mieszanki pełnodawkowej dla brojlerów cz. 1. *Technika Rolnicza-Ogrodnicza-Leśna*, 4, 13-15.
- 46 **Kulig R., 2013b.** Wpływ stopnia rozdrobnienia ziarna pszenicy na efektywność granulowania mieszanki pełnodawkowej dla brojlerów cz. 2. *Technika Rolnicza-Ogrodnicza-Leśna*, 6, 14-16.
- 47 **Kulig R., Laskowski J., 2002.** Pomiary zużycia pary wodnej w procesie kondycjonowania surowców i mieszanek paszowych. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (24), 134-141.
- 48 **Kulig R., Laskowski J., 2005.** Wpływ zawartości tłuszczu na proces granulowania materiałów paszowych. *Inżynieria Rolnicza*, 7(67), 59-68.
- 49 **Kulig R., Laskowski J., 2006.** Effects of Conditioning Methods on Energy Consumption During Pelleting. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 6, 67-74.
- 50 **Lamp A. E., Evans A. M., Moritz J. S., 2015.** The effects of pelleting and glucanase supplementation in hulled barley based diets on feed manufacture, broiler performance, and digesta viscosity. *Journal of Applied Poultry Research*, 00, 1-9.
- 51 **Landero J.L., Beltranena E., Cervantes M., Araiza A.B., Zijlstra R.T., 2012.** The effect of feeding expeller-pressed canola meal on growth performance and diet nutrient digestibility in weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 171, 240-245.
- 52 **Laskowski J., 1989.** *Studia nad procesem granulowania mieszanek paszowych.* Praca habilitacyjna, Wydawnictwo AR Lublin.
- 53 **Laskowski J., 1997.** Badania warunków granulowania mieszaniny rozdrobnionych nasion rzepaku i ziarna pszenicy, *Biuletyn Informacyjny Przemysłu Paszowego*, 2, 43-49.
- 54 **Laskowski J., Łysiak G., Skonecki S., 2005.** Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Part II. Material properties in grinding and agglomeration. *Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture Agrophysics, Institute of Agrophysics PAN, Lublin*, 159 ss.
- 55 **Laskowski J., Skonecki S., 2001.** Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 187-193.
- 56 **Leaver R. H., 2008.** *The pelleting process.* Andritz Sprout Bauer, Muncy, PA.
- 57 **Li Y.D., Wu D.F., Zhang J.P., Chang L., Wu D.H., Fang Z.P., Shi Y.H., 2000.** Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts. *Powder Technology*, 113, 176-184.

- 58 **Loar R.E., Corozo A., 2011.** Effects of feed formulation on feed manufacturing and pellet quality characteristics of poultry diets. *World's Poultry Science Journal*, 67 (01), 19–28.
- 59 **Loar R. E., Wamsley K. G. S., Evans A., Moritz J. S., Corzo A., 2014.** Effects of varying conditioning temperature and mixer-added fat on feed manufacturing efficiency, 28- to 42-day broiler performance, early skeletal effect, and true amino acid digestibility. *Journal of Applied Poultry Research*, 23, 444–455.
- 60 **Lordi N. G., Cocolas H., and Yamasaki H., 1997.** Analytical interpretation of powder compaction during the loading phase. *Powder Technology*, 90, 173–178.
- 61 **Lundblad K.K., Issa S., Hancock J.D., Behnke K.C., Prestløkken E., McKinney L.J., Alavi S., Fledderus J., Sørensen M., 2011.** Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning, and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility of nursery pigs and broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 169, 209–217.
- 62 **Łysiak G., Laskowski J., 2003.** Wpływ układu technologicznego linii rozdrabniania na energochłonność procesu. *Inżynieria Rolnicza*, 8(50), 271–277.
- 63 **Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansanj., 2004.** Evaluation of Compaction Equations Applied to Four Biomass Species. *Canadian Biosystems Engineering*, 46, 355–361.
- 64 **Marks, N., Sobol, Z., Baran, D., 2006.** Ocena wytrzymałości granulatu paszowego. *Inżynieria Rolnicza*, 3(78), 289–295.
- 65 **Merritt A.C., 2014.** Energy management for the feed industry. American Feed Industry Association, Arlington, USA.
- 66 **Muramatsu K., Maiorka A., Mores Vaccari I.C., Nuernberg Reis R., Dahlke F., Almeida Pinto A., Dias Orlando U.A., Bueno M., Imagawa M., 2013.** Impact of Particle Size, Thermal Processing, Fat Inclusion and Moisture Addition on Pellet Quality and Protein Solubility of Broiler Feeds. *Journal of Agricultural Science and Technology*, A 3, 1017–1028.
- 67 **Nilsson D., Bernesson S., Hansson P.A. 2011.** Pellet production from agricultural raw materials – A systems study. *Biomass and Bioenergy*, 35, 679–689.
- 68 **Obidziński S., 2014.** Utilization of post-production waste of potato pulp and buckwheat hulls in the form of pellets. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23 (4), 1391–1395.
- 69 **Obidziński S., Hejft R., 2012.** Wpływ parametrów techniczno-technologicznych procesu granulowania pasz na jakość otrzymanego produktu. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(1), 109–114.
- 70 **Obidziński, S., Hejft, R., 2013a.** Budowa układu mieszająco-zagęszczająco-dozującego granulatora do materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 1(141), 143–148.
- 71 **Obidziński, S., Hejft, R., 2013b.** The evaluation of the Power consumption process from the plant materials. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 13(2), 73–78.
- 72 **Osek M., Janocha A., Kłoczek B., Wasilowski Z., 2001:** Wpływ mieszanek zawierających różne tłuszcze na wskaźniki produkcyjne i jakość mięsa kurcząt rzeźnych. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXII (1), 153–164.
- 73 **Payne J., Rattink W., Smith T., Winowski T., 2001.** The pelleting handbook: a guide for production staff in the compound feed industry. Sarpsborg : Borregaard LignoTech, cop.
- 74 **Reece, F.N., Lott B.D., Deaton J.W., 1986.** The effects of hammer mill screen size on ground corn particle size, pellet durability, and broiler performance. *Poultry Science*, 65, 1257–1261.
- 75 **Reimer, L., 1992.** Conditioning. *Proc. Northern Crops Institute Feed Mill Management and Feed Manufacturing Technol. Short Course*, p. 7. California Pellet Mill Co. Crawfordsville, IN.
- 76 **Rynkiewicz, M., 2005.** Wstępna ocena wpływu stopnia rozdrobnienia komponentów i ciśnienia pary na wytrzymałość kinetyczną paszy granulowanej. *Inżynieria Rolnicza*, 4(64), 207–215.
- 77 **Rynkiewicz, M., 2008.** Wpływ stopnia rozdrobnienia granulowanej mieszanki paszowej na wytrzymałość kinetyczną granul i wydajność produkcji zwierzęcej. *Inżynieria Rolnicza*, 5(103), 229–235.
- 78 **Sagan A., Jaśkiewicz T., Kulig R., 2011.** Stabilność przechowalnicza witamin litofilnych w granulowanych mieszankach paszowych zawierających ekstrakt nasion Inianki (*Camelina sativa*) i preparat zakwaszający. *Acta Agrophysica*, 18(1), 143–148.
- 79 **Shankar, T. J., Bandyopadhyay S., 2007.** Prediction of extrudates properties using artificial neural networks. *Food and Bioproducts Processing*, 85(1), 29–33.
- 80 **Shankar, T. J., Sokhansanj S., Bandyopadhyay S, Bawa A.S., 2008.** A case study on optimization of biomass flow during single screw extrusion cooking using genetic algorithm (GA) and response surface method (RSM). *Food and Bioprocess Technology*, 3(4), 498–510.
- 81 **Schofield E. K., 2005.** Feed manufacturing technology V. American Feed Industry Association, Arlington, USA.
- 82 **Skonecki S., 2004.** Modelowanie ciśnieniowego zagęszczania materiałów roślinnych. *Rozprawy*

- Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, Zeszyt 279. ISSN 0860-4355.
- 83 **Skonecki S., Laskowski J., 2010.** Effect of particle size of fragmented wheat on energy requirements in the process of extrusion. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 10, 346–354.
- 84 **Stender D., Honeyman M.S. 2008.** Feeding pelleted DDGS-based diets to finishing pigs in deep-bedded hoop barns. *Journal of Animal Science*, 86 (Supp. 3), 84.
- 85 **Svihus B., 2001.** Norwegian poultry industry converts to whole grain pellets. *World Poultry – Elsevier*, 17 (12), 20–21.
- 86 **Svihus B., Gullord M., 2002.** Effect of chemical content and physical characteristics on nutritional value of wheat, barley and oats for poultry. *Animal Feed Science and Technology*, 102, 71–92.
- 87 **Svihus B., Kløvstad K.H., Perez V., Zimonja O., Sahlstrom S., Schuller R.B., Jeksrud W.K., Prestløkken E., 2004.** Physical and nutritional effects of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Animal Feed Science and Technology*, 117, 281–293.
- 88 **Szmigiel A., Oleksy A., 2005.** Wpływ nawożenia azotem na plonowanie nagoziarnistej i oplewionej odmiany jęczmienia jarego. *Fragmenta Agronomica*, 1(85), 585–590.
- 89 **Tabil, L. G. and S. Sokhansanj. 1996a.** Compression and compaction behaviour of alfalfa grinds. Part 1: Compression behaviour. *Powder Handling & Processing* 8(1).
- 90 **Tabil L. G. and S. Sokhansanj. 1996b.** Compression and compaction behaviour of alfalfa grind. Part 2: Compaction behavior. *Powder Handling & Processing* 8(2).
- 91 **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. *Animal Feed Science and Technology*, 64, 173–192.
- 92 **Tumuluru J.S., Wright C.H., Kenney K.L., Hess J.R., 2010.** A Technical Review on Biomass Processing: Densification, Preprocessing, Modeling and Optimization. ASABE Annual International Meeting, Paper Number: 1009401. David L. Lawrence Convention Center Pittsburgh, Pennsylvania, June 20–23.
- 93 **Walczyński, S., 2006.** Wpływ zastosowania całych ziaren pszenicy na efektywność granulowania mieszanek paszowych. *Inżynieria Rolnicza*, 7(82), 423–430.
- 94 **Wojdalski J., Drózd B., 2012.** Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego. Zarys problematyki i podstawowe definicje. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 3 (3), 37–49.
- 95 **Wojdalski J., Drózd B., 2014.** Audyt energetyczny i zmniejszanie energochłonności produkcji (rozdział 6. w monografii: Postęp technologiczny, żywieniowy i jakościowy w produkcji pasz i karm. Wybrane zagadnienia. Monografia pod red. K. Zawislaka i P. Sobczaka. Wydawca: Polskie Stowarzyszenie Producentów i Dystrybutorów Karmy dla Zwierząt Towarzyszących, Lublin, s. 63–91 (ISBN 978-83-63761-44-8).
- 96 **Wójtowicz A., Mościcki L., 2008.** Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 8, 311–318.
- 97 **Vukmirović D.M., Lević J.D., Fišteš A.Z., Čolović R.R., Brlek T.I., Čolović D.S., Đuragić O.M., 2015.** Influence of grinding method and grinding intensity of corn on mill energy consumption and pellet quality. *Hemijska industrija, OnLine-First Issue* 00, 12–12.
- 98 **Zarajczyk, J., 2013.** Uwarunkowania techniczne i technologiczne produkcji peletu z biomasy roślinnej na cele energetyczne. *Inżynieria Rolnicza*, 1(142), T.2, Kraków, ISSN 1429–7264.
- 99 **Zawislak K., Sobczak P., Panasiewicz M., 2010a.** Wpływ składu surowcowego na jakość pasz granulowanych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 546, 369–374.
- 100 **Zawislak K., Sobczak P., Panasiewicz M., Markowska A., 2010b.** Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość kinetyczną granulatu. *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria*, 9(1–2), 3–10.
- 101 **Zawislak K., Sobczak P., Andrejko D., Rydzak L., 2011.** Energochłonność procesu rozdrabniania wybranych odmian pszenicy, *Motorol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 13, 336–341.
- 102 **Zawislak K., Sobczak P., Nadulski R., Weldycz A., 2012.** Cechy wytrzymałościowe granulatu jako odzwierciedlenie jakości. *Motorol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 14 (5), 161–164.
- 103 **Zawislak K., Sobczak P., Panasiewicz M., Mazur J., Nadulski R., Starek A., 2014.** Wpływ wielkości frakcji otrąb pszenicznych na jakość granulatu. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 3/4 (11), 25–28.
- 104 **Zimonja O., Hetland H., Lazarevic N., Edvardsen D.H., Svihus B., 2008.** Effects of fibre content in pelleted wheat and oat diets on technical pellet quality and nutritional value for broiler chickens. *Canadian Journal of Animal Science*, 88, 613–622.

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH (ARTYSTYCZNYCH)

Pracę na Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie rozpocząłem w 1996 roku na stanowisku asystenta w Katedrze Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego. Od początku pracy zawodowej – pod kierunkiem prof. dr hab. Janusza Laskowskiego – moje zainteresowania naukowe skupiają się przede wszystkim na opisie procesu aglomerowania ciśnieniowego oraz związków pomiędzy właściwościami materiałów biologicznych a przebiegiem i wynikami procesu. Jest to nurt badawczy, który wpisany jest w działalność naszej Katedry od początku jej istnienia. Podejmowana tematyka badań, w okresie przed uzyskaniem stopnia doktora, opublikowana została w 5 pracach – w tym trzech oryginalnych pracach twórczych (A1, A2, A3)* i została zaprezentowana podczas konferencji naukowych (R1, R2, K1, K2, K3)*.

W celu poszerzenia zakresu prac badawczych prowadzonych w Katedrze, opracowałem i wykonałem prototypowe stanowisko badawcze (rys.1), umożliwiające prowadzenie kompleksowych badań z zakresu obróbki hydrotermicznej i granulowania materiałów sypkich. Pomiary parametrów procesu wykonywane są na podstawie opracowanej we własnym zakresie metodyki badawczej (A3, A5, O9).



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego procesu granulowania materiałów roślinnych (Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie)

* 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

W szczególności możliwe jest wykonanie szczegółowej analizy nakładów energii cieplnej – ponoszonych w procesie kondycjonowania – które to badania mogą wypełnić istniejącą do tej pory lukę badawczą z tego zakresu.

Kontynuacja badań związanych z przygotowaniem rozprawy doktorskiej, w tym pogłębiona analiza teoretyczna i badania eksperymentalne, pozwoliły mi na rozszerzenie realizowanej tematyki badawczej. Po uzyskaniu stopnia doktora w 2003 roku (praca doktorska została wyróżniona nagrodą III stopnia JM Rektora AR w Lublinie), prowadzone przeze mnie prace badawcze z zakresu procesu aglomerowania ciśnieniowego, dotyczą zarówno problematyki związanej z produkcją pasz aglomerowanych, jak też kompaktowanych biopaliw stałych. Badania te mają za cel optymalizację procesu aglomerowania materiałów o zróżnicowanych właściwościach – poprzez minimalizację nakładów energii – przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej jakości produktów (trwałości mechanicznej, gęstości).

Nurt badawczy zaprezentowany w publikacjach stanowiących osiągnięcie naukowe, znalazł również odzwierciedlenie w szeregu innych prac, stanowiących kontynuację i rozszerzenie problematyki podjętej w rozprawie doktorskiej. W pracach A10, A11 i A14 przedstawiono wpływ warunków i metod kondycjonowania na energochłonność bezpośrednią procesu w kontekście zużycia energii cieplnej i elektrycznej. Materiał badawczy stanowiły wybrane surowce zbożowe i strączkowe. Wykazano, że wielkość zużycia pary w procesie kondycjonowania zależy zarówno od temperatury obróbki hydrotermicznej, jak i stosowanego ciśnienia pary. Wzrost temperatury kondycjonowania w przedziale od 50 do 90°C powodował ponad 3-krotny średni przyrost zużycia pary i ciepła. Wśród cech charakteryzujących obrabiany materiał, najistotniejszy wpływ na zużycie pary wywierały takie jego właściwości jak ciepło właściwe oraz gęstość w stanie zsylnym. Optymalną temperaturą kondycjonowania pod względem energetycznym, dla większości badanych materiałów, okazała się być wartość 70°C. Po jej przekroczeniu, dominującą rolę w kształtowaniu wartości całkowitych jednostkowych nakładów energii granulowania, zaczynała pełnić energia cieplna dostarczana wraz z parą. Ponadto wykazano, że znajomość przyrostu temperatury granulatu po wyjściu z matrycy ponad temperaturę materiału przed prasowaniem, ma znaczenie prognostyczne odnośnie energochłonności procesu prasowania. Pomiędzy tymi parametrami stwierdzono istnienie bardzo silnej zależności liniowej ($r = -0,995$; $p < 0,05$ dla kondycjonowania parowego i $r = 0,996$; $p < 0,05$ dla kondycjonowania z dodatkiem wody).

Z kolei w pracach A4, A6, A12, A13, A15 i A16 wykazano zachodzące związki pomiędzy warunkami i metodami kondycjonowania a przebiegiem procesu i właściwościami

fizycznymi uzyskiwanych aglomeratów. Porównano obróbkę hydrotermiczną z kondycjonowaniem z dodatkiem wody. Wyniki tych prac zaprezentowano na konferencjach (K4 i K7 i K8). Zaobserwowano istnienie bardzo silnej liniowej zależności zarówno pomiędzy temperaturą kondycjonowania jak i ciśnieniem pary a wilgotnością materiału po kondycjonowaniu parowym ($R = 0,994$). Średnie wartości wilgotności wahały się w przedziale od 15,19 do 22,03%. Stwierdzono, że kondycjonowanie parowe w przypadku większości badanych surowców zapewniało uzyskanie granulatu o niższej wilgotności po wyjściu z matrycy niż kondycjonowanie z dodatkiem wody. Uzyskane średnie wartości tego parametru zawierały się w przedziale od 13,51 do 18,43% dla kondycjonowania parowego i od 10,23 do 21,22% dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Wykazano, że zastosowanie kondycjonowania parowego pozwala znacząco ograniczyć straty wydajności procesu. Dla większości badanych surowców, średnia zawartość cząstek rozkruszonych w granulacie zawierała się w przedziale od 2,03 do 4,12%. Natomiast w przypadku kondycjonowania z dodatkiem wody wahała się w zakresie od 1,2 do 19,82%. Stwierdzono, że warunki kondycjonowania wpływały istotnie na gęstość nasypową granulatu ($p < 0,05$), która malała wraz ze wzrostem temperatury obróbki parowej. Jednocześnie zwiększanie ciśnienia pary (w zakresie temperatury 50–70°C) powodowało liniowe przyrosty wartości tego parametru. Natomiast w przypadku kondycjonowania z dodatkiem wody, dla wszystkich badanych surowców, zaobserwowano istnienie silnych ujemnych zależności liniowych ($r > -0,93$), a średnie wartości parametru wahały się w przedziale od 438,3 do 756 kg·m⁻³. Zaobserwowano, że w przypadku surowców zbożowych, kondycjonowanie parowe zapewniało uzyskanie wysokiej wytrzymałości kinetycznej granulatu ($P_{DI} > 90\%$) niezależnie od rodzaju zboża. Natomiast w przypadku kondycjonowania z dodatkiem wody, tak wysokie wartości tego parametru uzyskiwała jedynie pszenica (surowiec o najwyższej zawartości białka). Podobne zależności odnotowano dla surowców strączkowych, które charakteryzują się jeszcze wyższą zawartością białka niż pszenica. Za każdym razem, niezależnie od zastosowanej metody kondycjonowania, otrzymany granulaty charakteryzował się wysoką wytrzymałością kinetyczną ($P_{DI} > 93\%$). Stąd też otrzymane wyniki świadczą o istotniejszym oddziaływaniu ciepła niż wilgotności na wytrzymałość granulatu otrzymywanego z surowców skrobiowych. Odwrotnie zaś zachowują się surowce wysokobiałkowe. Z kolei, w przypadku obydwu grup surowców oddziaływanie ciśnienia pary na wartość wytrzymałości było statystycznie nieistotne.

W pracach A7-A9 dokonano analizy wpływu składu chemicznego przerabianych materiałów (rozpatrywanego ze względu na zawartość tłuszczu i włókna) na efektywność

procesu granulowania. Uzyskane wyniki były przedmiotem prezentacji podczas konferencji (K5 i K6). W badaniach stosowano materiał o zmiennej zawartości tłuszczu i włókna, odpowiednio w zakresie od 1,92 do 20,8% i od 2,74 do 18,34%. Wykazano między innymi, że zużycie pary i ciepła zwiększało się wprost proporcjonalnie zarówno do wzrostu udziału tłuszczu, jak i włókna w materiale poddawany granulowaniu. Ponadto, zwiększanie zawartości tłuszczu zmniejszało energochłonność jednostkową prasowania; średnio od 151 do 59 kJ·kg⁻¹ dla kondycjonowania parowego i od 280 do 105 kJ·kg⁻¹ dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Przy czym zastosowanie kondycjonowania parowego powodowało redukcję wartości energii prasowania średnio o 25% w stosunku do metody z dodatkiem wody, ale powodowało wzrost całkowitej energochłonności procesu o 50%. Natomiast wraz ze zwiększaniem się udziału włókna w mieszaninie rosły jednostkowe nakłady energii prasowania; średnio od 150 do 335 kJ·kg⁻¹ dla kondycjonowania parowego i od 210 do 500 kJ·kg⁻¹ dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Zastosowanie kondycjonowania parowego powodowało redukcję wartości tego parametru (średnio o 27%) w stosunku do metody z dodatkiem wody. Jednak energochłonność całkowita procesu była średnio o 25% wyższa od metody kondycjonowania z dodatkiem wody. Z kolei, wraz ze wzrostem udziału tłuszczu wytrzymałość kinetyczna granulatu pogarszała się przyjmując minimalną wartość 78% w odniesieniu do metody granulowania z dodatkiem pary wodnej i 60% w odniesieniu do granulowania bez udziału pary. Zaobserwowano także, że udział włókna w mieszaninie w ilości 5,74% przyczyniał się do uzyskania wytrzymałości kinetycznej na poziomie 97%, a dalsze jego zwiększanie nie powodowało statystycznie istotnych zmian jakości granulatu.

Drugim głównym kierunkiem prowadzonych przeze mnie badań w zakresie procesu aglomerowania ciśnieniowego jest wykorzystanie biomasy do produkcji biopaliw stałych. Celem przeprowadzonych dotychczasowo badań było określenie podatności biomasy różnego pochodzenia na proces zagęszczania i jakość uzyskiwanych aglomeratów. W badaniach wykorzystano następujące surowce:

- trociny i wióry drzew miękkich i twardych (brzozowe, dębowe, sosnowe, topolowe);
- rośliny energetyczne (miskant, mozga trzcinowata, palczatka Gerarda, spartina, ślazier pensylwański, topinambur, wierzba wiciowa);
- siano łąkowe;
- słomę pszenną i rzepakową;
- wysłodki buraczane.

W kontekście oceny przebiegu procesu i jakości uzyskiwanego aglomeratu, analizie poddano wpływ takich czynników materiałowych i procesowych, jak: wielkość dodatku substancji lepiszczowych (A24–A26, A34, A35, A43), wilgotność materiału (A17–A19, A21–24, A30, A31, A35, F3), wielkość rozdrobnienia materiału (A17, A26, F3) oraz ciśnienie zagęszczania (A23, A25, A34, A36). Większość badań przeprowadzono w warunkach modelowych przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S, z komputerową rejestracją parametrów procesu zagęszczania oraz zespołu prasującego z matrycą zamkniętą. Prędkość przemieszczania tłoka wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. W trakcie badania rejestrowano krzywą, tzw. charakterystykę zagęszczania (zależność siły zagęszczania od przemieszczenia tłoka), z której określono parametry procesu (Laskowski i Skonecki, 2001). Wyznaczano maksymalną gęstość materiału w komorze ρ_c , jednostkową pracę zagęszczania L_c' ($L_c' = L_c \cdot m^{-1}$, gdzie: L_c - praca zagęszczania, m - masa próbki materiału). Dla otrzymanego brykietu określano gęstość aglomeratu po 48 h. przechowywania ρ_a . Obliczano stopień zagęszczenia aglomeratu (krotność zmniejszenia objętości) S_{za} ($S_{za} = \rho_a \cdot \rho_n^{-1}$) oraz współczynnik podatności materiału na zagęszczanie k_c ($k_c = L_c' \cdot (\rho_c - \rho_n)^{-1}$, gdzie: ρ_n - gęstość początkowa materiału w stanie zsypanym). Następnie określano jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. W tym celu otrzymane aglomeraty poddawano testowi ściskania na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z020/TN2S (prędkość przemieszczania głowicy wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Aglomerat o średnicy d i długości l ściskano poprzecznie do osi do momentu jego zniszczenia (pęknięcia) i wyznaczano maksymalną siłę niszczącą F_n . Obliczano tzw. odporność mechaniczną aglomeratu σ_n [MPa] z wzoru (Li i in., 2000):

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (32)$$

Szczególny nacisk w prowadzonych badaniach kładziono na otrzymywanie produktu o jak najwyższej jakości. Wynika to z faktu, że w przypadku produkcji aglomeratów (pelletów) do zastosowań nieprzemysłowych wymagania norm (PN-EN ISO 17225:2014) w zakresie trwałości mechanicznej są bardzo rygorystyczne. Jednocześnie produkcja biopaliw stałych w najbliższych latach może pójść w kierunku większego ich wykorzystania w mniejszych instalacjach grzewczych, które są bardziej wrażliwe na jakość biopaliwa.

Zadawalające rezultaty w tym zakresie uzyskano w badaniach, w których wykorzystywano lepiszcza lignocelulozowe. W przypadku badanych surowców, wraz ze wzrostem dodatku lepiszcza w zakresie od 0 do 2%, gęstość otrzymywanego aglomeratu wzrastała średnio o 20%, a stopień zagęszczenia materiału zwiększał się przeciętnie o 17%.

Natomiast wytrzymałość mechaniczna zwiększała się ok. 4-krotnie w przypadku trocin i średnio o 60% w przypadku pozostałych badanych materiałów. Niemniej jednak korzyści wynikające ze zwiększenia jakości produktu okupione były średnim wzrostem zapotrzebowania na energię zagęszczania, średnio o 13%. Spowodowane to było prawdopodobnie tym, że zwiększanie dodatku lepiszcza do surowca powodowało wzrost wartości współczynnika tarcia cząstek materiału o siebie i ścianki komory zagęszczania. Niektóre wyniki badań otrzymane w tym zakresie zostały zaprezentowane na konferencji naukowej (R7).

Z przeprowadzonych badań wynikało również, że oddziaływanie lepiszcza na wartość parametrów opisujących jakość produktu (stopień zagęszczenia, gęstość, wytrzymałość mechaniczna) w zależności od zakresu prowadzonych badań, uwidaczniało się najistotniej dla następujących wartości determinujących ją czynników:

- badania wpływu wilgotności – wartość 16% dla wytrzymałości mechanicznej i zakres 19-22% dla stopnia zagęszczenia i gęstości aglomeratu;
- badania wpływu ciśnienia zagęszczania – zakres 62–96 MPa;
- badania wpływu rozdrobnienia – materiał o najmniejszym stopniu rozdrobnienia.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają wnioskować, że dominującym czynnikiem materiałowym, wpływającym zarówno na przebieg procesu jak i jakość otrzymywanych aglomeratów, jest wilgotność surowca. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wzrost wilgotności surowca wpływał korzystnie na zwiększenie jego podatności na zagęszczanie. Przeciętny spadek jednostkowego zapotrzebowania na energię aglomerowania (w przedziale wilgotności 10–22%) wynosił 40%, a współczynnika k_c 45% (wartości średnie dla wszystkich badanych surowców). Jednak zwiększanie wilgotności materiału w badanym przedziale powodowało spadek odporności mechanicznej otrzymywanych aglomeratów, średnio o 45%. Badania przeprowadzone w tym zakresie przedstawiono między innymi w pracy F3, opublikowanej w czasopiśmie wyróżnionym w JCR (Polish Journal of Environmental Studies, $IF_{2014} = 0,871$). Niektóre wyniki badań, dotyczące niniejszego zagadnienia, były przedmiotem prezentacji podczas konferencji naukowej (R6).

Istotną rolę w wyżej wspomnianym kontekście odgrywał również gatunek przerabianego surowca, a tym samym jego właściwości fizyczne i chemiczne. Przykładowo, z porównania wyników badań miskanta, spartiny i ślazu pensylwańskiego (A18) wynikało, że najniższe zapotrzebowanie energii występowało podczas zagęszczania mączki z miskanta (średnio $22,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), najwyższe zaś odnosiło się do aglomerowania ślazu i wynosiło średnio $29,21 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Natomiast odporność mechaniczna aglomeratu przyjmowała

najwyższą wartość (0,67 MPa) w odniesieniu do produktu otrzymanego ze ślazu o wilgotności 10% i była przeciętnie o 100% wyższa od produktu otrzymanego z miskanta. Z kolei, prawidłowe formowanie brykieta z miskanta cukrowego wymagało wilgotności materiału sypkiego na poziomie ok. 14%. Natomiast w przypadku spartiny preriowej i ślazu pensylwańskiego możliwe to było przy najniższej stosowanej wilgotności materiału. Badania tych samych surowców i w takim samym zakresie, przeprowadzono także w warunkach przemysłowych (brykietarka typu PBH-100), gdzie w pełni potwierdzono wyniki otrzymane w skali laboratoryjnej. W badaniach tych wykazano również, że wartość energochłonności określona dla urządzenia przemysłowego (średnio $512,87 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) jest ok. 20 razy wyższa od wartości wyznaczonej w warunkach modelowych (średnio $25,44 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Różnice te wynikały zapewne ze strat energii w zespołach napędowych (roboczych) urządzenia, co wiąże się z jego sprawnością techniczną.

Badania przeprowadzone w zakresie wpływu wielkości rozdrobnienia surowca (zakres zmienności średniego wymiaru cząstek 0,82 do 1,96 mm) wykazały, że wraz ze wzrostem średniej wielkości cząstek materiału, dochodziło do zwiększenia zapotrzebowania na energię zagęszczania średnio o 12%. Jednocześnie zmniejszała się podatność materiału na zagęszczanie (średnio o – 11%). Ponadto stwierdzono, że stopień zagęszczenia materiału w komorze, jak też aglomeratu, przyjmował najwyższe wartości (odpowiednio 23,8 i 11,7) dla materiału o najmniejszym rozdrobnieniu.

Z kolei badania mające na celu ustalenie wpływu jednostkowego nacisku tłoka na parametry procesu zagęszczania biomasy energetycznej przeprowadzono w zakresie zmian ciśnienia od 45 do 113 MPa. Stwierdzono, że gęstość materiału w komorze zagęszczania rosła wraz ze zwiększaniem ciśnienia zagęszczania przeciętnie o 23% (wartość średnia dla wszystkich badanych surowców). Wzrost ciśnienia zagęszczania w badanym przedziale powodował również zwiększenie gęstości aglomeratu przeciętnie o 17%. Stopień zagęszczenia materiału w komorze rósł w całym badanym przedziale zmienności ciśnienia przeciętnie o 24%. Z kolei stopień zagęszczenia aglomeratu wzrastał jedynie w przedziale ciśnienia 45-96 MPa, średnio o 24%. Natomiast dalsze zwiększanie ciśnienia nie przynosiło istotnych statystycznie zmian wartości tego parametru. Jednostkowa praca zagęszczania oraz współczynnik materiału na zagęszczanie zwiększały się wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania. Średnie zmiany w pierwszym przypadku wynosiły 85%, a w drugim 72%. Zwiększanie ciśnienia zagęszczania w badanym przedziale powodowało średnio prawie 2-krotny wzrost wytrzymałości mechanicznej otrzymywanych aglomeratów.

W celu popularyzacji prowadzonej działalności badawczej, dotyczącej procesów aglomerowania ciśnieniowego, niektóre wyniki badań – mające szczególne znaczenie użytkowe – opublikowałem w czasopiśmie Technika Rolnicza-Ogrodnicza-Leśna. Prace A28 i A29 dotyczyły procesu granulowania mieszanek DKA-G, bazujących na pszenicy, charakteryzującej się różną wielkością rozdrobnienia. Celem pracy było przedstawienie możliwości poszukiwań zmniejszenia energochłonności procesu przy zachowaniu wysokiej jakości produktu gotowego. Z kolei, w pracach A38 i A39 przedstawiono wyniki badań oddziaływania wilgotności surowca na przebieg procesu aglomerowania ciśnieniowego topinamburu i mozgi trzcinowatej w kontekście wytwarzania ekologicznego biopaliwa stałego. Oceniono podatność badanych materiałów na proces brykietowania przy wykorzystaniu brykietarki typu PBH-100 firmy Protechnika. W konkluzji wskazano optymalne warunki prowadzenia procesu brykietowania tych surowców. Natomiast w pracy A27 oceniono efektywność rozdrabniania materiału lignocelulozowego na przykładzie słomy rzepakowej. Badania przeprowadzono na rozdrabniaczu bijakowym, przy wykorzystaniu sit o różnych średnicach otworów. W pracy zaprezentowano wpływ średnicy otworów sit rozdrabniacza na energochłonność i wydajność procesu.

Ostatnimi laty problematykę badawczą rozszerzyłem także o inne zagadnienia, związane zarówno z prowadzoną działalnością badawczą, jak też dydaktyczną. Wpływ na to miały również zainteresowania rozwinięte podczas wcześniej realizowanych prac dyplomowych, jak i umiejętności nabyte w czasie studiów podyplomowych. Jednocześnie fakt ten wiązał się z koniecznością podjęcia współpracy z innymi jednostkami naukowymi (zał. IV p. Q).

Zainteresowania związane z prowadzoną działalnością naukowo-dydaktyczną, dotyczące inżynierii przemysłu rolno-spożywczego, znalazły odzwierciedlenie w publikacjach A37, A40, F1. W szczególności, w ramach problematyki związanej z inżynierią przetwórstwa zbożowego i piekarnictwa, uczestniczyłem w przygotowaniu pracy F1 opublikowanej w czasopiśmie wyróżnionym w JCR (Journal of Texture Studies, IF₂₀₁₄ = 1,367). Celem pracy było porównanie fizycznych i sensorycznych właściwości chleba produkowanego nowatorską metodą, w której rozczyn wytwarzany jest w całości z mąki owsianej, z metodą standardową na rozczynie pszennym. Wykazano, że w przypadku chleba pszenno-owsianego możliwe jest wytworzenie go na podłożu owsianej. Zastosowanie podłoża owsianej zwiększało wydajność produkcji a dodatkowo wpływało pozytywnie na właściwości miękiszu.

Wśród moich zainteresowań badawczych znajdują się również zagadnienia, które były przedmiotem badań prowadzonych jeszcze w ramach pracy magisterskiej, a dotyczące

procesów suszarniczych. W efekcie podjętej współpracy z Katedrą Techniki Ciepłej, uczestniczyłem w opracowaniu publikacji A33 i F2 – czasopismo wyróżnione w JCR (LWT – Food Science and Technology, IF₂₀₁₄ = 2,416). Celem pracy F2 było określenie kinetyki liofilizacji żurawiny, a także opisanie zmian biochemicznych zachodzących w produkcie po wysuszeniu. Zarówno całe jak i rozdrobnione owoce żurawiny suszone były za pomocą laboratoryjnego liofilizatora w temperaturze 30, 50 i 70°C, przy stałym ciśnieniu w komorze suszącej. Stwierdzono, że w wyniku rozdrobnienia surowca, czas suszenia zmniejsza się o około połowę. W przypadku całych owoców najlepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych wykazywał model logarytmiczny. Natomiast w przypadku rozdrobnionych owoców, zadawające efekty uzyskano w wyniku stosowania modelu Page’a i modelu Wang’a i Singh’a. Zaobserwowano, że dodatek kwasu L-askorbinowego i kwasu cytrynowego polepszał kolorystykę produktu po suszeniu. Natomiast podwyższenie temperatury suszenia powodowało spadek aktywności przeciwutleniającej we wszystkich badanych próbkach.

Zainteresowania rozwinięte podczas studiów podyplomowych z informatyki technicznej przyczyniły się do udziału w publikacji A46. W pracy tej przedstawiono wykorzystanie programu 3ds MAX w inżynierii rolniczej do wizualizacji i animacji złożów konstrukcji maszyn rolniczych. W pierwszej kolejności zamodelowano trójwymiarowy (3D) prototyp urządzenia czyszczącego, a następnie ukazano wizualizację jego złożenia i montażu. Proces implementacji komputerowej wizualizacji okazał się w tym przypadku szczególnie przydatny w dydaktyce, jak również w reklamie innowacyjnych urządzeń.

W ramach badań procesu aglomerowania ciśnieniowego poszerzyłem posiadany dorobek o prace dotyczące właściwości mechanicznych surowców roślinnych (A35 i A42). Wynika to z chęci poszukiwania związków pomiędzy tymi właściwościami a przebiegiem i efektami procesu – co zaprezentowałem w pracy O9 – będącej przedmiotem przedstawionego osiągnięcia naukowego. Brałem także udział w przygotowaniu publikacji dotyczącej badań wartości żywieniowej granulowanych mieszanek paszowych (A20). W jeszcze innym aspekcie tego procesu, zainteresowałem się zagadnieniami związanymi z logistyką dostaw. To z kolei wiąże się z faktem, że proces ten pozwala na znaczną redukcję objętości materiału i wzrost jego gęstości. W następstwie ułatwia to jego składowanie i transport oraz zmniejsza wymaganą wielkość kubatur magazynowych, przyczyniając się jednocześnie do zmniejszenia kosztów magazynowania i obrotu handlowego. W tym kontekście zostały opublikowane prace A42, A43 i A44.

6. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWO-BADAWCZEGO

Mój dotychczasowy dorobek naukowy związany jest przede wszystkim z moimi zainteresowaniami badawczymi dotyczącymi procesu aglomerowania ciśnieniowego materiałów biologicznych. Obejmuje łącznie 66 pozycji (58 prac znajduje się na liście czasopism punktowanych przez MNiSW – zał. IV), w tym 52 oryginalne prace twórcze, 6 artykułów popularno-naukowych, oraz 8 streszczeń opublikowanych w materiałach pokonferencyjnych (tab. 3 i 4). Spośród 52 prac oryginalnych, 21 napisanych jest w języku angielskim, z czego 5 to publikacje indeksowane w bazie Journal Citation Reports (JCR), posiadające Impact Factor. W 10 publikacjach jestem jedynym autorem, a w pozostałych współautorem ze znacznym wkładem w ich przygotowanie.

Tabela 3. 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	5	5	5
Prace oryginalne opublikowane w czasopismach recenzowanych	A	0	0	0	1	15	16	16
	P	0	3	3	5	23	28	31
Inne prace								
Prace popularno-naukowe opublikowane w czasopismach recenzowanych	P	0	0	0	4	2	6	6
Streszczenia pokonferencyjne	P	0	2	2	0	6	6	8
Łącznie		0	5	5	10	51	61	66

Tabela 4. Punktacja opublikowanych prac wg MNiSW

Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	IF ^a	IF 5-Year ^b	Suma punktów MNiSW	
				zgodnie z rokiem wydania*	w roku 2015**
Osiągnięcie naukowe					
Biosystems Engineering;	1	1,619	1,960	35	35
International Agrophysics;	1	1,117	1,034	25	25
Inżynieria Rolnicza;	2			9	10
Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering;	1			6	5
Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa;	2			8	8
Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa;	2			12	12
Razem	9	2,736	2,994	95	95
Pozostałe czasopisma punktowane					
Acta Agrophysica;	6			30	42
Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria;	1			3	3
Annual Review of Agricultural Engineering;	1			5	-
Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe;	1			4	4
Inżynieria Rolnicza;	9			38	45
Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering;	3			13	15
Journal of Texture Studies;	1	1,367	1,509	25	25
Logistyka;	3			30	30
LWT – Food Science and Technology;	1	2,416	3,095	35	35
Mechanik;	1			7	7
Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa;	4			16	16
Polish Journal of Environmental Studies;	1	0,871	0,888	15	15
Przegląd Zbożowo-Młynarski;	1			0,5	-
Technika Rolnicza-Ogrodnicza-Leśna;	5			20	20
Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa;	11			62	66
Razem	49	4,654	5,492	303,5	323
<u>Publikacje punktowane łącznie</u>	<u>58</u>	<u>7,39</u>	<u>8,486</u>	<u>398,5</u>	<u>418</u>
<i>Publikacje punktowane łącznie przed doktoratem</i>	3	0	0	12	15
<i>Publikacje punktowane łącznie po doktoracie</i>	55	7,39	8,468	386,5	403

*Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku braku danych przy publikacjach z roku 2015, przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2014

**Punktacja MNiSW określona według aktualnie obowiązującej listy z dnia 31 grudnia 2014

^a IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2015 podano ostatni dostępny IF₂₀₁₄ według JCR

^b IF_{5-year} – średni pięcioletni impact factor określony według JCR

SUMA PUNKTÓW UZYSKANYCH ZA DOTYCHCZASOWE PUBLIKACJE:

Całkowita liczba punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania publikacji:	398,5
Całkowita liczba punktów MNiSW zgodnie z aktualną listą czasopism:	418
Sumaryczny IF zgodnie z rokiem wydania publikacji wg JCR:	7,39
Sumaryczny średni 5 letni Impact Factor wg JCR:	8,486

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

Liczba punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania publikacji:	303,5
Liczba punktów MNiSW zgodnie z aktualną listą czasopism:	323
IF zgodnie z rokiem wydania publikacji wg JCR:	4,654
Średni 5 letni Impact Factor wg JCR:	5,492

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

Lublin, dn. 16.09.2015

Ryszard Kulig