

Sławomir OBIDZIŃSKI, Roman HEJFT

e-mail: obislaw@pb.edu.pl

Zakład Techniki Rolno-Spożywczej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, Białystok

Dobór parametrów techniczno-technologicznych procesu granulowania odpadów roślinnych

Wstęp

Przebieg procesu zagęszczania, jego wydajność i energochłonność oraz jakość otrzymanego produktu są ściśle związane z parametrami aparaturowo-procesowymi [Hejft, 2002]. Laskowski [1989] uważa zaś, że każdy czynnik mający wpływ na przebieg procesu granulowania nie może być analizowany bez uwzględnienia zachowania się innych czynników. Potwierdzają to Yaman i in. [2000] uważając, że ciśnienie zagęszczania i inne parametry prowadzenia procesu powinny zostać dobrane w zależności od zagęszczanego materiału.

W poszukiwaniu najkorzystniejszych parametrów prowadzenia procesu zagęszczania (z uwagi na minimalizację energochłonności procesu) należy przyjmować, że uzyskany granulát powinien posiadać odpowiednią trwałość (powinien charakteryzować się określoną wytrzymałością kinetyczną) np. ze względu na transport, magazynowanie lub też fizjologię żywienia zwierząt (w przypadku granulatu paszowego) [Obidziński, 2005].

Dążenie do otrzymania wysokiej jakości produktów ciśnieniowej aglomeracji powinno być nadrzędnym celem producentów [Walczyński, 2004; Thomas i in., 1998]. Jednakże, w opinii wielu badaczy, otrzymanie granulatu o wysokiej jakości jest jednak trudne, gdyż wpływa na to wiele czynników, np. skład surowcowy mieszanki, stopień rozdrobnienia poszczególnych składników, jednorodność mieszanki, zawartość tłuszczu, wpływ metody granulowania i parametrów konstrukcyjnych układu roboczego użytego do zagęszczania [Walczyński, 2004, Thomas i in., 1998].

Wielu badaczy zajmujących się procesem zagęszczania materiałów roślinnych poszukiwało najkorzystniejszych parametrów techniczno-technologicznych prowadzenia tego procesu. Chou i in. [2009a,b], poszukiwali optymalnych warunków otrzymywania brykietu opałowego ze słomy ryżowej i otrębów ryżowych, w procesie zagęszczania w układzie tłok-matryca. Razuan i in. [2011] szukali najkorzystniejszych wartości ciśnienia zagęszczania, temperatury, wilgotności biomasy i dodatku lepszczu na gęstości i wytrzymałości granulatu wytworzonego z mięszu palmowego. Gilbert i in. [2009] badali wpływ ciśnienia zagęszczania i temperatury procesu na gęstość i mechaniczną wytrzymałość granulatu ze słomy pszennej i trawy. Mani i in. [2006] poszukiwali optymalnych wartości ciśnienia zagęszczania, wilgotności materiału i wielkości jego cząstek materiału zagęszczanego.

Celem naszych badań było określenie najkorzystniejszych parametrów techniczno-technologicznych procesu zagęszczania mieszaniny roślinnych odpadów otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej pozostającej jako odpad przy wytwarzaniu skrobi ziemniaczanej.

Po badaniach wstępnych procesu zagęszczania samych otrębów owsianych oraz badaniach wpływu zawartości wycierki na przebieg procesu granulowania oraz jakość granulatu [Obidziński, 2013], dalsze badania prowadzono przy zawartości wycierki 20%. Taki dodatek wycierki zapewnia otrzymanie granulatu o zadowalającej jakości. Wcześniejsze badania [Obidziński, 2013], wykazały również, że wskazane jest, aby otręby owsiane przed procesem zagęszczania rozdrabniać, co zmniejszyłoby ich tendencje do ślizgania się po powierzchni otworu w matrycy i ułatwiłoby ich wiązanie w granulki z żelifikującą pod wpływem temperatury i wilgoci skrobią z wycierki.

Opis badań

Materiały

W pracy przedstawiono wyniki badań procesu granulowania mieszaniny rozdrobnionych otrębów owsianych (powstających w Podlaskich Zakładach Zbożowych S.A. w Białymstoku) i wycierki ziemniaczanej

pozostającej jako odpad przy wyplukiwaniu skrobi z ziemniaków (w zakładach PEPEES S.A w Łomży).

Stanowisko badawcze

Badania zagęszczania mieszaniny otrębów owsianych z wycierką ziemniaczaną, przeprowadzono na stanowisku SS-3, z układem roboczym: otwarta komora zagęszczania – tłok zagęszczający [Obidziński, 2011; 2012].

W skład stanowiska wchodzi praska ręczna, na której podstawie zamocowano otwartą komorę zagęszczania (posiadająca otwór o średnicy 8 mm), do której zasypywano badany materiał. Komora zagęszczania jest ogrzewana, dzięki czemu możliwa jest regulacja temperatury procesu. Ogrzewanie komory zagęszczania jest realizowane za pomocą opaski grzejnej nałożonej od góry na element termostatujący. Zagęszczanie mieszanki odbywało się za pomocą tłoka z czujnikiem tensometrycznym pozwalającym na rejestrację sił działających na tłok. Sygnały z układu tensometrów naklejonych na tłoku zagęszczającym doprowadzono do rejestratora typu Spider 8 (sprzężonego z komputerem) i zapisywano, a następnie poddano dalszej obróbce z wykorzystaniem oprogramowania MS Excel i Statistica 10.0 PL.

Metodyka badań

Badania procesu zagęszczania wycierki ziemniaczanej na stanowisku SS-3 wykonano według planu eksperymentu Hartleya PS/DS-P. Wielkościami wejściowymi były parametry materiałowe i techniczno-technologiczne:

$x_1 = l_m$ – długość otworów w matrycy (37; 42 i 47 mm),

$x_2 = t_w$ – temperatura procesu (50, 70 i 90°C),

$x_3 = d_c$ – wielkość cząstki otrębów owsianych (1; 1,5 i 2 mm),

$x_4 = m_p$ – masa zagęszczanej porcji (0,5; 0,85 i 1,2 g).

Wartości tych parametrów określono na podstawie wcześniejszych badań [Obidziński, 2013], które pozwoliły ustalić też 20% zawartość wycierki w zagęszczanych mieszankach do dalszych badań.

Badania składały się z następujących etapów:

- przygotowanie surowca przed procesem zagęszczania (rozdrobnienie otrębów owsianych i ich podział na odpowiednie frakcje, rozdrobnienie wycierki ziemniaczanej do odpowiedniej wielkości frakcji, zmieszanie rozdrobnionej wycierki z otrębami owsianymi, umieszczenie przygotowanej mieszanki w szczelnie zamkniętych woreczkach foliowych na 48 godz. w temperaturze otoczenia),
- określenie wilgotności zagęszczanych próbek,
- wygrzewanie matrycy i próbek do zadanej temperatury,
- zagęszczanie (granulowanie) przygotowanych próbek mieszanki w komorze otwartej (o średnicy 8 mm) i rejestracja wyników,
- oznaczenie gęstości granulatu oraz pracy zagęszczania.

Przed rozpoczęciem procesu zagęszczania wygrzewano wcześniej komorę zagęszczania oraz próbki surowca do wymaganej w danym punkcie planu eksperymentu temperatury. W trakcie badań, zagęszczano po 20 próbek dla każdego punktu planu eksperymentu.

Rozdrabnianie otrębów owsianych przeprowadzono z wykorzystaniem rozdrabniacza tarczowego WŻ-2, a rozdrabnianie wycierki ziemniaczanej z wykorzystaniem wstrząsarki laboratoryjnej WU-3, wyposażonej w sito o średnicy oczek 1,0; 1,5 oraz 2 mm.

Wilgotności mieszanek badanych odpadów oznaczono zgodnie z PN-76/R-64752 za pomocą wagosuszarki WPE 300S, każdorazowo określając wilgotność pięciu próbek o masie 5 g, które suszono w temperaturze 105°C do uzyskania stałej masy. Za wynik końcowy wilgotności przyjęto wartość średnią z otrzymanych oznaczeń.

Oznaczanie gęstości granulatu wykonano bezpośrednio po opuszczeniu komory zagęszczania, mierząc suwmiarką wysokość i średnicę piętnastu granul z dokładnością $\pm 0,02$ mm oraz określając ich masę wagą laboratoryjną z dokładnością $\pm 0,001$ g. Gęstość aglomeratu obliczano jako stosunek masy granul do sumy ich objętości.

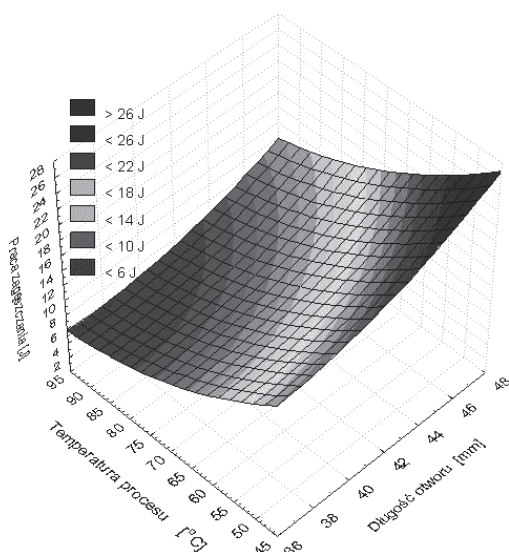
Wyniki badań i ich analiza

Tab. 1 oraz rys. 1–4 przedstawiają wyniki badań wpływu badanych parametrów na wartości pracy zagęszczania oraz gęstość granulatu otrzymanego w procesie granulowania mieszanki odpadów otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej.

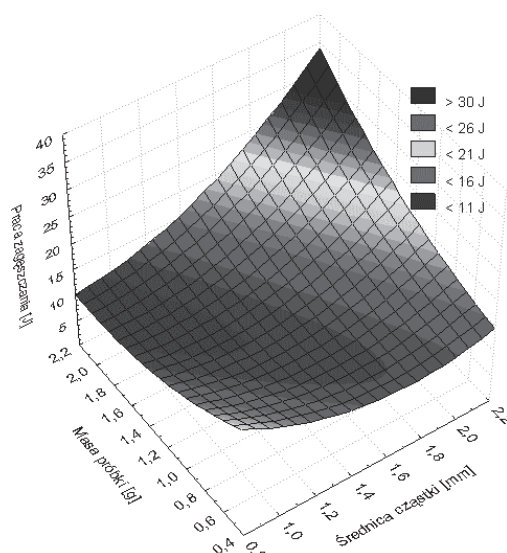
Tab. 1. Wyniki badań wpływu parametrów techniczno-technologicznych na pracę zagęszczania oraz gęstość granulatu otrzymanego w procesie granulowania

| N | Zmienne niezależne | | | | Zmienne zależne | |
|----|--------------------|------------|------------|-----------|-----------------|-------------------------------|
| | l_m [%] | t_w [°C] | d_c [mm] | m_p [g] | L_z [J] | ρ_g [kg/m ³] |
| 1 | 47 | 50 | 1 | 0,5 | 26,34 | 1156,27 |
| 2 | 37 | 90 | 1 | 0,5 | 6,58 | 1139,60 |
| 3 | 37 | 50 | 2 | 0,5 | 13,83 | 1018,56 |
| 4 | 47 | 90 | 2 | 0,5 | 11,49 | 1074,72 |
| 5 | 47 | 50 | 1 | 1,2 | 24,60 | 1156,32 |
| 6 | 37 | 90 | 1 | 1,2 | 7,80 | 1129,74 |
| 7 | 37 | 50 | 2 | 1,2 | 21,56 | 1059,03 |
| 8 | 47 | 90 | 2 | 1,2 | 14,66 | 1002,28 |
| 9 | 37 | 70 | 1,5 | 0,85 | 4,88 | 942,57 |
| 10 | 47 | 70 | 1,5 | 0,85 | 8,77 | 951,34 |
| 11 | 42 | 50 | 1,5 | 0,85 | 11,47 | 1070,72 |
| 12 | 42 | 90 | 1,5 | 0,85 | 2,60 | 1021,57 |
| 13 | 42 | 70 | 1 | 0,85 | 3,96 | 1083,44 |
| 14 | 42 | 70 | 2 | 0,85 | 12,70 | 1037,19 |
| 15 | 42 | 70 | 1,5 | 0,5 | 24,46 | 1099,71 |
| 16 | 42 | 70 | 1,5 | 1,2 | 15,76 | 1117,61 |
| 17 | 42 | 70 | 1,5 | 0,85 | 13,64 | 1136,26 |

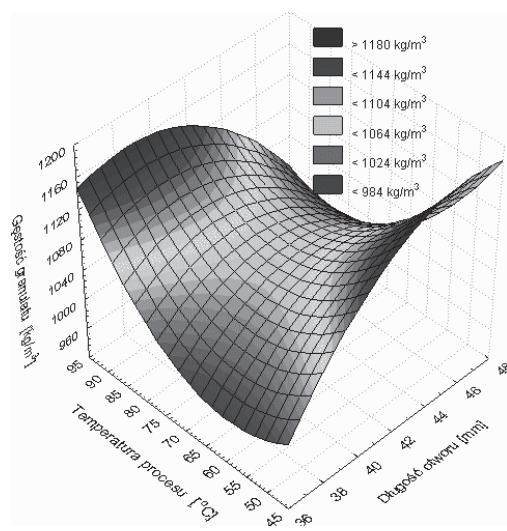
Zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od 50 do 90°C spowodowało spadek wartości pracy zagęszczania przy każdej z długości matrycy (Rys. 1). Przykładowo, zwiększenie temperatury procesu od 50 do 90°C (przy: długości otworu w matrycy 37 mm, masie zagęszczanej próbki 0,5 g) spowodowało spadek wartości pracy zagęszczania o 52,4% (z 13,83 do 6,58 J), zaś przy: długości otworu w matrycy 47 mm i masie zagęszczanej próbki 0,5 g, praca zagęszczania spadła z 26,34 do 11,49 J (o 56%). Spadek pracy zagęszczania uzyskany przy rosnącej temperaturze procesu spowodowany był zwiększeniem stopnia żelifikacji skrobi zawartej w wycierce i tworzeniem coraz większych ilości lepiscza (mieszanki skrobi i wilgoci) wraz ze wzrostem temperatury, co przy-



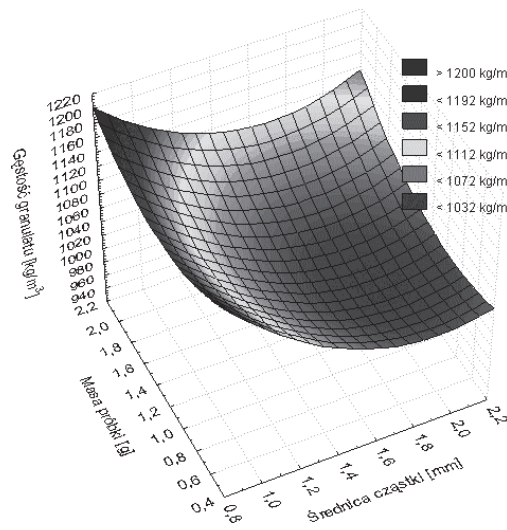
Rys. 1. Wpływ temperatury procesu i długości otworu w matrycy na pracę zagęszczania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej



Rys. 2. Wpływ średnicy cząstek zagęszczanych odpadów i masy zagęszczanej próbki na pracę zagęszczania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej



Rys. 3. Wpływ temperatury procesu i długości otworu w matrycy na gęstość granulatu otrzymanego z mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej



Rys. 4. Wpływ średnicy cząstek zagęszczanych odpadów i masy zagęszczanej próbki na gęstość granulatu z mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej

czyniło się do spadku oporów przetłaczania i jednocześnie zmniejszenia pracy zagęszczania.

Zwiększenie masy zagęszczanej próbki mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej z 0,5 do 1,2 g spowodowało wzrost wartości pracy zagęszczania. Przykładowo, zwiększenie masy próbki mieszanki z 0,5 do 1,2 g (przy średnicy zagęszczanych cząstek 2 mm, temperaturze procesu 50°C i długości otworów w matrycy 37 mm) powoduje wzrost pracy zagęszczania o 35,85% (z 13,83 do 21,56 J). Wzrost pracy zagęszczania uzyskany przy rosnącej masie zagęszczanej próbki spowodowany był zwiększeniem rzeczywistej powierzchni kontaktu zagęszczanej mieszanki z powierzchnią otworu matrycy, co przyczyniło się do wzrostu oporów przetłaczania i jednocześnie wzrostu pracy zagęszczania.

Zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od 50 do 90°C spowodowało wzrost gęstości otrzymanego granulatu (przy długości otworów w matrycy od 37 do 42 mm). Przy dalszym wzroście długości otworu w matrycy do 47 mm nastąpił spadek gęstości otrzymanego granulatu.

Przykładowo, zwiększenie temperatury procesu od 50 do 90°C (przy długości otworu w matrycy 37 mm, masie zagęszczanej próbki 0,5 g) spowodowało wzrost gęstości otrzymanego granulatu z 1018,56 do 1139,60 kg/m³ (o ok. 10,6%).

Uzyskane wyniki pozwoliły na stwierdzenie, że 37 mm to długość, przy której możliwe jest otrzymanie granulatu o wysokiej gęstości (powyżej 1000 kg/m³) przy jednocześnie najmniejszych wartościach pracy zagęszczania.

Zgodnie z normami dotyczącymi granulatu drzewnego w krajach europejskich [Hiegl i in., 2009] oraz zgodnie z wprowadzonym w 2011 roku certyfikatem EN 14961 i jego polskim odpowiednikiem – normą PN-EN 14961 [EN 14961] na podstawie uzyskanych gęstości granulatu można zaliczyć go do pełnowartościowych paliw stałych, za które uważa się granulaty o gęstości powyżej 1000 kg/m³.

Wzrost gęstości otrzymanego granulatu (przy rosnącej długości otworów w matrycy od 37 do 42 mm) wraz ze wzrostem temperatury procesu spowodowany był zwiększeniem stopnia żelifikacji skrobi zawartej w wycierce ziemniaczanej i powstawaniem coraz większych ilości lepizcza (mieszanki skrobi i wilgoci), co prowadziło do powstawania coraz trwalszych wiązań cząstek mieszanki i w konsekwencji wzrost gęstości granulatu. Dalsze zwiększenie długości otworu od 42 do 47 mm spowodowało wydłużenie czasu przebywania zagęszczanej mieszanki w otworze, co wpłynęło na powstawanie coraz to większych ilości pary wodnej w mieszance (przy rosnącej temperaturze procesu i rosnących wraz z długością otworu naciskach zagęszczających) wraz ze zwiększaniem temperatury.

Uzyskane wyniki badań, potwierdzają wcześniejsze przypuszczenia przedstawione w pracy [Obidziński, 2013]. Rozdrobnienie otrębów owsianych przed procesem zagęszczania zmniejszyło ich tendencje do ślizgania się po powierzchni otworu w matrycy i ułatwiło ich wiązanie w granulaty z żelifikującą pod wpływem temperatury i wilgoci skrobią z wycierki. Poza tym, rozdrobnienie otrębów owsianych pozwoliło na uzyskanie granulatu o gęstości (od ok. 942 do ponad 1156 kg/m³), większej do ok. 26% w porównaniu z gęstością granulatu otrzymanego przy udziale nierozdrobnionych otrębów owsianych w mieszance z 20% wycierki ziemniaczanej (od ok. 840 do ok. 921 kg/m³) [Obidziński, 2013]. Pozytywny wpływ rozdrabniania na jakość granulatu potwierdzają Carone i in. [2010], którzy prowadząc proces zagęszczania odpadów drzewa oliwkowego stwierdzili, że gęstość otrzymanego granulatu rośnie wraz ze zmniejszeniem wielkości cząstki surowca.

Przeprowadzone badania pozwoliły na stwierdzenie, że dodanie do otrębów owsianych wycierki ziemniaczanej spowodowało, że badana mieszanka jest materiałem o wysokiej podatności na zagęszczanie. Dodatek wycierki zdecydowanie podnosi podatność otrębów owsianych na zagęszczanie [Obidziński, 2013].

Wnioski

- Temperatury procesu granulowania jak i wilgotności zagęszczanego materiału mają istotny wpływ na wartości pracy zagęszczania i gęstość otrzymanego granulatu.

- Z punktu widzenia energochłonności procesu i gęstości otrzymanego granulatu najkorzystniejszą temperaturą procesu zagęszczania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej jest temperatura 90°C.
- Długość matrycy, przy której możliwe jest otrzymanie granulatu o zadowalającej gęstości (powyżej 1000 kg/m³) przy jednocześnie najmniejszych wartościach pracy zagęszczania wynosi 37 mm.
- Najkorzystniejszą masą zagęszczanej próbki, przy której otrzymano najmniejsze wartości pracy zagęszczania oraz największą gęstość granulatu jest masa 0,5 g.
- Rozdrobnienie otrębów owsianych przed procesem granulowania pozwala na uzyskanie granulatu o gęstości większej do ok. 26% w porównaniu z gęstością granulatu otrzymanego przy udziale otrębów nierozdrobnionych. Z punktu widzenia energochłonności procesu i gęstości otrzymanego granulatu najkorzystniejszą średnicą zagęszczanej cząstki jest średnica 1 mm.
- Uzyskane wartości gęstości granulatu z mieszanki wycierki i otrębów owsianych od ok. 942 do ponad 1156 kg/m³ pokazują, że przy 20% dodatku wycierki do rozdrobnionych otrębów owsianych możliwe jest otrzymanie granulatu o wysokiej jakości przy umiarkowanych nakładach energetycznych.

LITERATURA

- Carone M.T., Pantaleo A., Pellerano A., 2010. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy* **30**, 1-9. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.052
- Chou C.S., Lin S.H., Lu W.C., 2009a: Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel Processing Technology*, **90**, 980-987. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.04.012
- Chou C.S., Lin S.H., Peng C. C., Lu W.C., 2009b: The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. *Fuel Processing Technology* **90**, 1041-1046. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.04.007
- EN 14961 – 1 (PN-EN 14961-1:2010). *Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne*
- Gilbert P., Ryu C., Sharifi V., Swithenbank J., 2009. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, **88**, 1491-1497. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.03.015
- Hejft R., 2002. *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. Bibl. Probl. Eksp., Radom
- Hiegl W., Janssen R., Pichler W., 2009. Advancement of pellets-related European standards. WIP Renewable Energies. http://eaci-projects.eu/iee/files/show.jsp?att_id=10237&place=pa&url=Pellet%20standards.pdf&prid=1656
- Laskowski J., 1989. *Studia nad procesem granulowania mieszanek paszowych. Praca habilitacyjna*. Wyd. Akademii Rolniczej, Lublin
- Mani S., Lope G., Tabil L.G., Sokhansanj S., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, **30**, 648-654. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.01.004
- Obidziński S., 2005: *Granulowanie materiałów roślinnych w pierścieniowym układzie roboczym granulatora*. Praca doktorska, Pol. Białostocka, Białystok
- Obidziński S., 2011. Badanie procesu zagęszczania odpadów tytoniowych. *Inż. Ap. Chem.*, **50**, nr 1, 29-30
- Obidziński S., 2012. Pelletization process of postproduction plant waste. *International Agrophysics*, **26**, nr 3, 279-284. DOI: 10.2478/v10247-012-0040-8
- Obidziński S., 2013. Ocena procesu wytwarzania granulatu opałowego z otrębów owsianych z udziałem wycierki ziemniaczanej. *Acta Agrophysica*, **20**, nr 2, (w druku)
- Razuan R., Finney K.N., Chen Q., Sharifi V.N., Swithenbank J., 2011. Pelletised fuel production from palm kernel cake. *Fuel Processing Technology*, **92**, 609-615. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.11.018
- Thomas M., van der Vliet T., Poel A.F.B., 1998. Physical quality of pelleted animal feed. 3. Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science Technology*, **71**, 59-78. DOI: 10.1016/S0377-8401(97)00072-2
- Walczyński S., 2004. Jakość granulatu ważnym czynnikiem w hodowli zwierząt. *Pasze Przemysłowe*, nr 10, 14-16
- Yaman S., Sahan M., Haykiri-Acma H., Sesen K., Kucukbayrak S., 2000. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. *Fuel Processing Technology*, **68**, 23-31. DOI: 10.1016/S0378-3820(00)00111-9
- Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr NN 504488239.**