

## OCENA PROCESU WYTWARZANIA GRANULATU OPAŁOWEGO Z OTRĄB OWSIANYCH Z UDZIAŁEM WYCIERKI ZIEMNIACZANEJ\*

*Sławomir Obidziński*

Zakład Techniki Rolno-Spożywczej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok  
e-mail: obislaw@pb.edu.pl

**Streszczenie.** Celem badań było określenie najkorzystniejszych parametrów procesu zagęszczania mieszaniny roślinnych odpadów otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej, co pozwoliłoby na opracowanie technologii wytwarzania granulatu opałowego z tych odpadów. Badania przeprowadzono na stanowisku SS-3, z układem roboczym „otwarta komora zagęszczania-tłok zagęszczający”, używając komory otwartej o średnicy 8 mm i długości  $l_o = 47$  mm. Określono wpływ zawartości wycierki ziemniaczanej ( $z_w = 10\%$ ,  $20\%$  i  $30\%$ ) w mieszaninie z otrębami owsianymi i temperatury procesu zagęszczania ( $t_p = 50$ ,  $70$  i  $90^\circ\text{C}$ ) na przebieg procesu (maksymalne naciski zagęszczające uzyskane w trakcie procesu zagęszczania) i gęstość uzyskanego granulatu. Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że najkorzystniejszym z punktu widzenia jakości granulatu dodatkiem wycierki do otrębów owsianych jest dodatek  $20\%$ , który pozwala na uzyskanie zadowalającej gęstości granulatu (powyżej  $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Taka gęstość otrzymanego granulatu czyni go pełnowartościowym paliwem stałym. Wyniki tych badań pozwoliły na wstępne określenie parametrów realizacji procesu zagęszczania w układzie roboczym granulatora z układem „płaska matryca – rolki zagęszczające”. Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie szczegółowych wytycznych technologii wytwarzania granulatu opałowego i paszowego, czego owocem było zgłoszenia patentowe autora.

**Słowa kluczowe:** granulaty, otręby owsiane, wycierka ziemniaczana, naciski zagęszczające, jakość granulatu

### WPROWADZENIE

Sprostanie założeniom strategii rozwoju energetyki odnawialnej wiąże się z koniecznością celowej uprawy specjalnych gatunków roślin z przeznaczeniem wyłącznie na cele energetyczne (Kulig i Skonecki 2011) lub coraz bardziej efektywne wykorzystanie odpadów biomasowych.

---

\*Praca wykonana w ramach działalności statutowej S/WM/2/10, realizowanej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej.

Bogatym źródłem energii z biomasy jest rolnictwo i różne branże przemysłu spożywczego, które generują olbrzymie ilości odpadów poprodukcyjnych (np. łuska gryki powstająca przy produkcji kaszy w zakładach zbożowych, wyciąki owocowe powstające przy produkcji soków owocowych, wyciąki rzepakowe powstające przy produkcji oleju rzepakowego, odpady zielarskie itp.). Odpady te często są wykorzystane w niewielkim stopniu i stanowią olbrzymi problem dla danego zakładu.

Jednym ze sposobów zagospodarowania różnego rodzaju odpadów roślinnych jest ich granulowanie lub brykietowanie do postaci paliwa stałego (granulatu, brykietu) (Hejft 2002, Stolarski 2006, Dziki i in. 2010, Skonecki i Potręć 2010, Kulig i Skonecki 2011, Mani i in. 2006, Shaw 2008, Kaliyan i Morey 2009, Razuan i in. 2011) lub w przypadku pylistych odpadów rolno-spożywczych – aglomeracja bezciśnieniowa w granulatorach talerzowych bądź bębnowych (Gluba i Obraniak 2008, Obraniak i Gluba 2011) bądź aglomeracja dwustopniowa, tj. aglomeracja bezciśnieniowa i następująca po niej aglomeracja ciśnieniowa (Hryniewicz i in. 2008).

Zgodnie z istniejącymi doniesieniami literaturowymi, konwersja poprodukcyjnych odpadów roślinnych do postaci granulatu może odbywać się w połączeniu z innymi odpadami roślinnymi: mieszaniny miąższu oliwkowego powstającego przy produkcji oleju i odpadów dębowych (Miranda i in. 2012), mieszanki trocin i poprodukcyjnych odpadów rzepy powstających przy produkcji oleju z rzepy (Stahl i Berghel 2011), mieszaniny odpadów tytoniowych w połączeniu z odpadami ziołowymi (Obidziński 2012), mieszanki kory i trocin sosny szkockiej (Filbakk i in. 2011) lub również w połączeniu biomasy, np. z węglem (Poskrobko i in. 2010, Gil i in. 2010, Gil i in. 2010a) lub z dodatkami niebiomasowymi, np. tworzyw sztucznych (Wandrasz i Wandrasz 2006) lub odpadami komunalnymi (Moran i in. 2009).

Bardzo często niemożliwe jest jednak bezpośrednie wykorzystanie tych odpadów jako surowca do produkcji granulatu lub brykietu z wielu powodów: np. z powodu zbyt małej wielkości cząstek – materiały pyliste, z powodu zbyt dużej zawartości tłuszczu – makuchy rzepakowe, czy też z powodu zbyt dużej wilgotności odpadu, czego przykładem jest wycierka ziemniaczana, powstająca w zakładach przemysłu rolno-spożywczego, będąca odpadem poprodukcyjnym w produkcji skrobi ziemniaczanej itp. W związku z tymi problemami, poszukiwane są w praktyce przemysłowej technologie wytwarzania granulatu opałowego (paszowego) z rozdrobnionych odpadowych materiałów pochodzenia roślinnego w połączeniu z innymi odpadami, pozwalające na ich scalanie w procesie zagęszczania (ciśnieniowej aglomeracji) i zapewniające wysoką jakość otrzymanego granulatu (Obidziński 2012a).

Przeprowadzone przez autora badania zagęszczania wycierki ziemniaczanej (Obidziński 2009) potwierdziły, że jest ona materiałem bardzo dobrze poddającym się procesowi zagęszczania. Jest jednak materiałem o bardzo wysokiej wilgotności, przekraczającej 88% (Obidziński 2010). Taka zawartość wilgoci stanowi poważny

problem przy stosowaniu wycierki jako surowca do produkcji ekologicznego paliwa stałego w postaci granulatu lub brykietów opałowych (Obidziński 2010). Istnieje więc konieczność jej dosuszania przed procesem zagęszczania lub zagęszczania w mieszaninie z innymi materiałami o niskiej wilgotności.

Zagęszczanie różnego rodzaju mieszanin surowców odpadowych m.in. z przemysłu rolno-spożywczego lub kompilacji różnego rodzaju składników odpadowych pochodzenia roślinnego z innymi dodatkami (również pochodzenia roślinnego) potwierdzają liczne, prowadzone przez wiele ośrodków naukowych w Polsce i na świecie, badania eksperymentalne.

Celem pracy było określenie wpływu zawartości wycierki ziemniaczanej w mieszaninie z otrębami owsianymi na energochłonność procesu granulowania oraz na jakość uzyskanego granulatu, w aspekcie jego wykorzystania jako paszy lub paliwa opałowego.

#### MATERIAŁ I METODYKA

W pracy przedstawiono wyniki badań procesu granulowania mieszaniny odpadów zbożowych w postaci otrębów owsianych (powstających w Podlaskich Zakładach Zbożowych S.A. w Białymstoku) i wycierki ziemniaczanej pozostającej jako odpad przy wypłukiwaniu z ziemniaków skrobi (w zakładach PEPEES S.A w Łomży).

Badania zagęszczania mieszaniny otrębów owsianych z wycierką ziemniaczaną przeprowadzono na stanowisku SS-3, z układem roboczym „otwarta komora zagęszczania-tłok zagęszczający” (Obidziński 2009, 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 może być realizowane za pomocą opaski grzejnej nałożonej od góry na specjalny element termostatu lub tylko z wykorzystaniem elementu termostatu, do którego można doprowadzić króćcem wodę o określonej temperaturze z ultratermostatu. Zagęszczanie mieszaniny odbywało się za pomocą tłoka z czujnikiem tensometrycznym pozwalającym na rejestrację sił działających na tłok.

Stanowisko SS-3 oprzyrządowano w aparaturę kontrolno-pomiarową, która pozwalała na jednoczesny pomiar i rejestrację: sił działających na tłok zagęszczający, sił działających na ścianki komory zagęszczania (na tłoczki umieszczone na różnej wysokości komory zagęszczania), przemieszczenie tłoka zagęszczającego, za pomocą czujnika przemieszczenia (Obidziński 2009).

Sygnaly z układu tensometrów naklejonych na tłoku zagęszczającym, tłoczków bocznych oraz z czujnika przemieszczenia doprowadzono do mostka tensometrycznego, a następnie rejestrowano rejestratorem sprzężonym z komputerem, w postaci plików binarnych, które poddano dalszej obróbce z wykorzystaniem oprogramowania Statistica 9.0.

W trakcie badań zagęszczania badanej mieszanki poszukiwano optymalnego dla technologii pelletowania składu mieszanki (wycierka ziemniaczana-otręby owsiane). W badaniach prowadzono proces zagęszczania mieszanek o udziałach masowych  $z_w = 10\%$ ,  $20\%$  i  $30\%$  wycierki ziemniaczanej w mieszaninie z otrębami owsianymi. Badania wykonano w komorze otwartej o długości  $l_o = 47$  mm, w temperaturach  $t_p = 50, 70$  i  $90^\circ\text{C}$ , zagęszczając (przetłaczając) po 20 próbek o masie  $m_p = 1$  g dla każdego punktu pomiarowego.

Badanie procesu zagęszczania mieszaniny otrębów owsianych z wycierką ziemniaczaną składało się z następujących etapów:

- przygotowanie surowca przed procesem zagęszczania (rozdrobienie wycierki ziemniaczanej do frakcji około 4 mm, zmieszanie rozdrobnionej wycierki z otrębami owsianymi, umieszczenie przygotowanej mieszanki w szczelnie zamkniętych woreczkach foliowych i przetrzymywanie przez 48 godziny 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,
- badanie gęstości otrzymanego granulatu.

Rozdrabnianie wycierki ziemniaczanej przeprowadzono z wykorzystaniem wstrząsarki laboratoryjnej WU-3, wyposażonej w sito o średnicy oczka 4 mm. W wyniku pracy wstrząsarki uzyskiwano ze zbitej masy wycierki ziemniaczanej cząstki o średnicy około 4 mm i mniejsze, które pozwalały na właściwy przebieg procesu mieszania wraz z otrębami owsianymi.

Oznaczanie wilgotności badanych odpadów wykonano zgodnie z PN-76/R-64752 za pomocą wagosuszarki WPE 300S. Każdorazowo określano wilgotność pięciu próbek o masie 5 g, które suszono w temperaturze  $105^\circ\text{C}$  do momentu 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 granул z dokładnością  $\pm 0,02$  mm oraz określając ich masę wagą laboratoryjną z dokładnością  $\pm 0,001$  g. Gęstość aglomeratu obliczano jako stosunek masy granул do sumy ich objętości.

## WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 1 i w tabeli 1 przedstawiono wartości średnie maksymalnych nacisków zagęszczających oraz gęstości granulatu otrzymane w procesie granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej w zależności od badanych parametrów (zawartości wycierki w mieszance  $z_w$  oraz temperatury procesu granulowania  $t_p$ ).

**Tabela 1.** Wartości średnie maksymalnych nacisków zagęszczających oraz gęstości granulatu otrzymane w procesie granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej w zależności od zawartości wycierki w mieszaninie i od temperatury procesu

**Table 1.** Average values of maximum densification pressures and pellets density obtained in the pelleting process of the mixture of oat bran and potato pulp in dependence on potato pulp content in the mixture and on the process temperature

Temperatura procesu Process temperature (°C)	Maksymalne naciski zagęszczające Maximum densification pressures (MPa)			Gęstość granulatu Pellets density (kg·m <sup>-3</sup> )		
	$z_w = 10\%$	$z_w = 20\%$	$z_w = 30\%$	$z_w = 10\%$	$z_w = 20\%$	$z_w = 30\%$
50	3,72a	8,30	3,48a	719,11	840,94	671,24
70	2,80	9,33a	5,22a	757,45	875,49	652,59
90	2,66	9,26	3,48	790,94	920,95	530,10

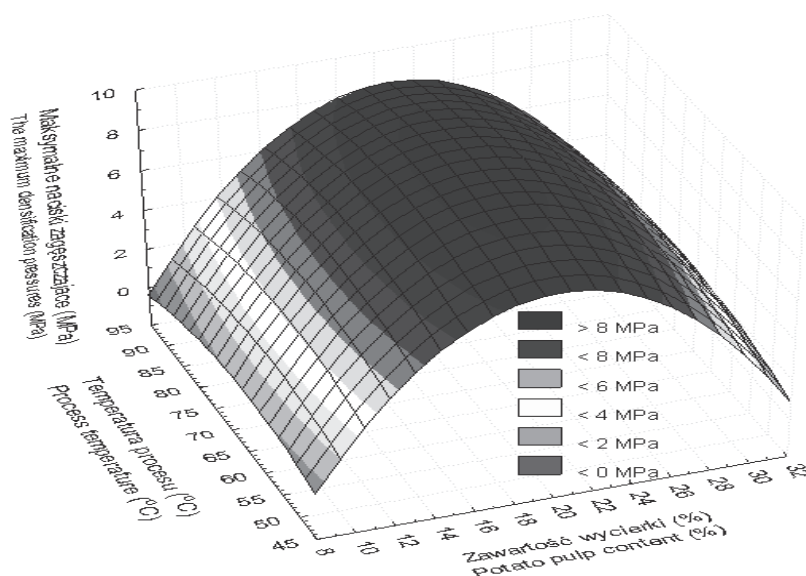
\* Średnie w poszczególnych wierszach tabeli, oznaczone tą samą literą, nie różnią się istotnie na poziomie  $\alpha = 0,05$  – \* Averages in the lines of the table, marked the same letter, do not differ significantly at the level of  $\alpha = 0.05$

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono istotny wpływ zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi jak również temperatury procesu granulowania na wartości maksymalnych nacisków zagęszczających i gęstość otrzymanego granulatu.

Przeprowadzona dwuczynnikowa analiza wariancji przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  pozwoliła na stwierdzenie istotnego wpływu temperatury procesu granulowania ( $p < 0,0001$ ) i zawartości wycierki ziemniaczanej ( $p < 0,0001$ ) oraz interakcji między tymi czynnikami ( $p < 0,0001$ ) na średnie wartości maksymalnych nacisków zagęszczających. Przy wykorzystaniu procedury porównań wielokrotnych najmniejszej istotnej różnicy, stwierdzono statystycznie istotne różnice pomiędzy wartościami średnimi maksymalnych nacisków zagęszczających w temperaturze 50°C przy zawartości wycierki 10 i 20% ( $p < 0,0001$ ) oraz przy 20 i 30% ( $p < 0,0001$ ).

W temperaturze 70°C nie stwierdzono istotnych różnic między średnimi wartościami nacisków otrzymanymi przy zawartości wycierki 20 i 30% ( $p < 0,0001$ ). Przy temperaturze 90°C statystyczne istotnie różnice ( $p < 0,0001$ ) otrzymano dla wszystkich par maksymalnych nacisków zagęszczających.

Nierozdrobnione otręby owsiane (po dostarczeniu z PZZ Białystok) posiadające wilgotność 5,09% (rys. 2) są materiałem o niewielkiej podatności na zagęszczanie. Dodatek 10% wycierki do otrębów owsianych powoduje wzrost wilgotności mieszanki do 13,38%. Śliska łuska owsiana i niewielka ilość pozostałego w otrębach bielma i wilgoci powodują, że w trakcie zagęszczania mieszanka jest przetłaczana przy otwory matrycy przy niewielkich naciskach zagęszczających (3,72 MPa przy temperaturze 50°C czy też 2,66 MPa przy temperaturze 90°C), a jednocześnie jakość otrzymanego granulatu jest bardzo niska.



**Rys. 1.** Zależność maksymalnych nacisków zagęszczających od zawartości wycierki w mieszaninie z otrębami owsianymi i temperatury procesu granulowania

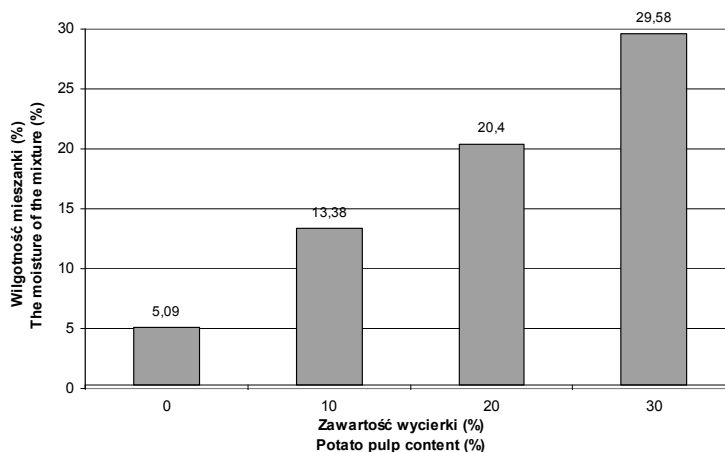
**Fig. 1.** Dependence of the maximum densification pressures on the content of potato pulp in the mixture with oat bran and on the densification process temperature

Zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi z 10 do 20% spowodowało wzrost nacisków zagęszczających o około 123% przy temperaturze 50°C (z 3,72 do 8,30 MPa) i aż o około 248% przy temperaturze 90°C (z 2,66 do 9,26 MPa) – tabela 1. Wzrost nacisków zagęszczających wraz ze zwiększeniem zawartości wycierki spowodowany był zwiększeniem wilgotności

mieszanki (z 13,38% do 20,40) – rys. 2, co spowodowało zwiększenie ilości lepiszcza w mieszance, które w kontakcie z powierzchnią otworu w matrycy powodowało zwiększenie oporów przetłaczania (mieszanka już nie ślizgała się po powierzchni otworu w matrycy, jak przy 10% dodatku wycierki do otrębów owsianych) i w konsekwencji wzrosły naciski zagęszczające.

Dalsze zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z 20 do 30% spowodowało spadek nacisków zagęszczających o ok. 58% przy temperaturze 50°C (z 8,30 do 3,48 MPa) i o około 62,5% przy temperaturze 90°C (z 9,26 do 3,44 MPa) – tabela 1. Było to wynikiem wzrostu wilgotności mieszanki z 20,40% do 29,58% (rys. 2). Taka wilgotność powodowała powstanie dużej ilości cieczy w mieszance, która pełniła rolę „smaru” przy kontakcie zagęszczanej mieszanki z otworem matrycy w trakcie zagęszczania i w konsekwencji powodowała obniżenie nacisków zagęszczających.

Zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od 50 do 90°C spowodowało spadek nacisków zagęszczających o około 40% przy 10% zawartości wycierki (z 3,72 do 2,66 MPa) – tabela 1.



**Rys. 2.** Zależność wilgotności mieszaniny otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od zawartości wycierki w mieszaninie

**Fig. 2.** Dependence of the moisture of the mixture of oat bran and potato pulp on potato pulp content in the mixture

Inna tendencja występowała przy 20 i 30% zawartości wycierki w mieszance z otrębami. W tym przypadku zwiększenie temperatury procesu granulowania od 50 do 70°C spowodowało wzrost nacisków o około 12,5% przy 20% zawartości wycierki (z 8,30 do 9,33 MPa) oraz wzrost nacisków o około 50% przy 30% zawartości wycierki (z 3,48 do 5,22 MPa) – tabela 1. Dalsze zwiększanie temperatury od

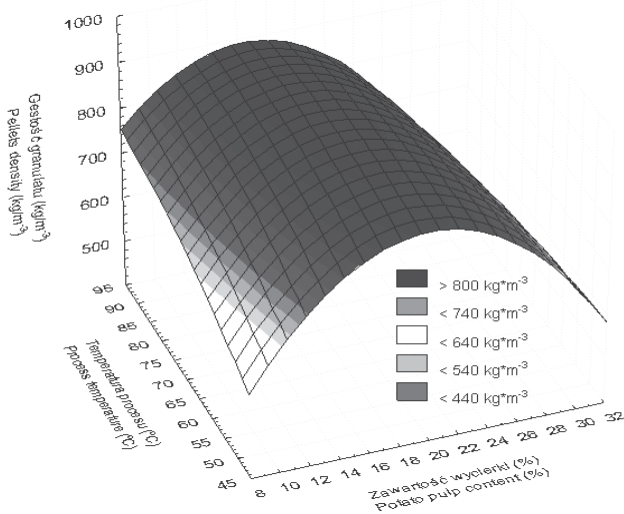
70 do 90°C powoduje spadek nacisków zagęszczających. Spadek nacisków zagęszczających po przekroczeniu temperatury 70°C spowodowany był zwiększeniem stopnia żelifikacji skrobi zawartej w wycierce i tworzeniem coraz większych ilości lepiscza (mieszanki skrobi i wilgoci) wraz ze wzrostem temperatury, co przyczyniło się do spadku oporów przetłaczania i jednocześnie zmniejszenia wartości nacisków zagęszczających.

Wpływ zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi  $z_w$  oraz temperatury procesu  $t_p$  na wartości maksymalnych nacisków zagęszczających  $p_{Omax}$ , po eliminacji zmiennych nieistotnych opisano równaniem:

$$p_{Omax} = -19,06 + 2,119 \cdot z_w + 0,193 \cdot t_p - 0,054 \cdot z_w^2 + 0,001 \cdot z_w \cdot t_p - 0,002 \cdot t_p^2 \quad (1)$$

Po przeprowadzeniu regresji nieliniowej modelu (równania) (1), stwierdzono, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , wyrazami istotnymi w przyjętym modelu są jedynie wyrazy związane z zawartością wycierki tj.  $(2,119 \cdot z_w)$  oraz  $(0,054 \cdot z_w^2)$ .

Na rysunku 3 przedstawiono zależność gęstości otrzymanego granulatu od zawartości wycierki ziemniaczanej w mieszance  $z_w$  oraz od temperatury procesu granulowania  $t_p$ .



**Rys. 3.** Zależność gęstości otrzymanego granulatu od zawartości wycierki w mieszaninie z otrębami owsianymi i temperatury procesu granulowania

**Fig. 3.** Dependence of the density of the pellets produced on the content of potato pulp in the mixture with oat bran and on the densification process temperature



Przeprowadzona dwuczynnikowa analiza wariancji przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  pozwoliła na stwierdzenie istotnego wpływu temperatury procesu granulowania ( $p < 0,0001$ ) i zawartości wycierki ziemniaczanej ( $p < 0,0001$ ) oraz interakcji między tymi czynnikami ( $p < 0,0001$ ) na średnie wartości gęstości granulatu. Przy wykorzystaniu procedury porównań wielokrotnych najmniejszej istotnej różnicy, stwierdzono statystycznie istotne różnice pomiędzy wartościami średnimi gęstości granulatu otrzymanego przy każdej z badanej temperaturze i każdej z badanych zawartości wycierki ( $p < 0,0001$ ).

Przeprowadzone badania wykazały, że przy mniejszym niż 20% dodatku wycierki jakość granulatu była niska. Uzyskane wartości gęstości granulatu są niskie. Granulat rozpadał się lub bardzo łatwo rozkruszał się. W takim wypadku (przy mniejszych zawartościach wycierki) należałoby otręby owsiane rozdrabniać, co zmniejszyłoby ich tendencje do ślizgania się po powierzchni otworu w matrycy i ułatwiłoby ich wiązanie w granuli z żelifikującą pod wpływem temperatury i wilgoci skrobią z wycierki.

Zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi od 10 do 20% wpłynęło na wzrost gęstości otrzymanego granulatu o około 15,5% przy temperaturze 50°C (z 719,11 do 840,94 kg·m<sup>-3</sup>) i o około 14% przy temperaturze 90°C (z 790,94 do 920,95 kg·m<sup>-3</sup>) – tabela 1. Wzrost gęstości otrzymanego granulatu wraz ze zwiększeniem zawartości wycierki spowodowany był wzrostem ilości lepszczu i wilgoci mieszanki (rys. 2), które pojawiły się w mieszance wraz ze zwiększeniem ilości wycierki. Zwiększenie ilości lepszczu powodowało powstawanie coraz trwalszych wiązań cząstek mieszanki i w konsekwencji spowodowało wzrost gęstości granulatu.

Dalsze zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi od 20 do 30% wpłynęło na spadek gęstości otrzymanego granulatu o około 25% przy temperaturze 50°C (z 840,94 do 671,24 kg·m<sup>-3</sup>) i o około 43% przy temperaturze 90°C (z 920,95 do 530,10 kg·m<sup>-3</sup>) – tabela 1. Zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi od 20 do 30% spowodowało zbyt duży wzrost wilgotności mieszanki z 20,40% do 29,58% (rys. 2), co skutkowało rozprężaniem nowopowstałego granulatu wskutek parowania nadmiaru wody zawartej w mieszance, po opuszczeniu komory zagęszczania.

Zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od 50 do 90°C spowodowało wzrost gęstości otrzymanego granulatu o około 10%, przy 10% dodatku wycierki (z 719,11 do 790,94 kg·m<sup>-3</sup>) oraz o około 9,5% przy 20% zawartości wycierki w mieszance (z 840,94 do 920,95 kg·m<sup>-3</sup>) – tabela 1. Wzrost gęstości otrzymanego granulatu wraz ze wzrostem temperatury procesu spowodowany był zwiększeniem stopnia żelifikacji skrobi zawartej w wycierce i powstawaniem coraz większych ilości lepszczu (mie-

szanki skrobi i wilgoci) co prowadziło do powstawania coraz trwalszych wiązań cząstek mieszanki i w konsekwencji wzrost gęstości granulatu.

Jedynie przy 30% zawartości wycierki w mieszance z otrębami, zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki od 50 do 90°C spowodowało spadek gęstości otrzymanego granulatu o około 11% (z 671,24 do 530,10 kg·m<sup>-3</sup>) – tabela 1. W tym przypadku, zwiększenie temperatury procesu granulowania mieszanki otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej od 50 do 90°C skutkowało rozprężaniem nowopowstałego granulatu wskutek parowania nadmiaru wody zawartej w mieszance przy rosnącej temperaturze procesu. Rozprężanie nowopowstałego granulatu wpłynęło na spadek gęstości uzyskanego granulatu.

Wpływ zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi  $z_w$  oraz temperatury procesu  $t_p$  na gęstość otrzymanego granulatu  $\rho_{go}$ , opisano równaniem:

$$\rho_{go} = -319,6 + 88,61 \cdot z_w + 11,12 \cdot t_p - 1,921 \cdot z_w^2 - 0,265 \cdot z_w \cdot t_p - 0,041 \cdot t_p^2 \quad (2)$$

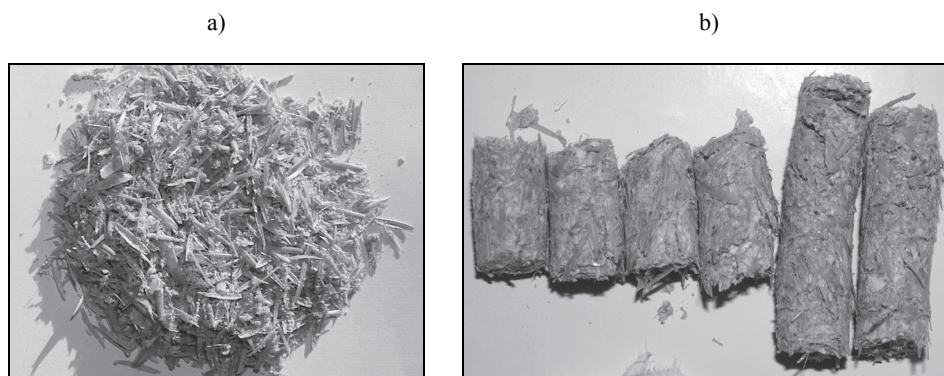
Przeprowadzona analiza regresji nieliniowej (równanie 2), pozwoliła na stwierdzenie, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  wyrazami istotnymi w przyjętym modelu są wyrazy związane z zawartością wycierki tj.  $(88,61 \cdot z_w)$  oraz  $(1,921 \cdot z_w^2)$ .

Uzyskane wartości gęstości granulatu (ponad 900 kg·m<sup>-3</sup>) przy zawartości wycierki 20% i temperaturach powyżej 70°C pozwalają na stwierdzenie, że uzyskany granulak ma wysoką jakość i stanowi pełnowartościowe paliwo stałe, za które uważa paliwo o gęstości ponad 1000 kg·m<sup>-3</sup>, zgodnie z istniejącymi normami dotyczącymi granulatu drzewnego w krajach europejskich tj.: DIN 51731 – Niemcy, ÖNORM M 7135 – Austria czy też SS 18 71 20 – Szwecja (Wach 2005, 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 fotografii 1 pokazano mieszankę otrębów owsianych i wycierki ziemniaczanej, poddawanej zagęszczaniu oraz przykładowe granule otrzymane przy 20% zawartości wycierki w mieszance i przy temperaturze procesu 70°C.

Jak pokazały badania, granulak otrzymany przy zawartości wycierki 20% charakteryzował się wysoką gęstością i wytrzymałością, a jego powierzchnia była równomierna i gładka.

Wyniki przeprowadzonych w układzie roboczym „otwarta komora zagęszczania-tłok zagęszczający” pozwoliły na wstępne określenie parametrów realizacji procesu zagęszczania w układzie roboczym granulatora z układem „płaska matryca – rolki zagęszczające”. Po przeprowadzeniu badań w układzie roboczym granulatora zostały opracowane szczegółowe wytyczne technologii wytwarzania granulatu opałowego (paszowego) z udziałem wycierki ziemniaczanej, czego owocem było zgłoszenie patentowe autora (Obidziński 2012a).



**Fot. 1.** a) Mieszanka otrębów owsianych i 20% wycierki ziemniaczanej, b) Granulat otrzymany z mieszanki otrębów owsianych i 20% wycierki ziemniaczanej

**Photo. 1.** a) Mixture of oat bran with 20% content of potato pulp, b) Pellets produced from the mixture of oat bran with 20% content of potato pulp

#### WNIOSKI

1. Zwiększenie zawartości wycierki w mieszance z otrębami owsianymi jak również temperatury procesu granulowania skutkowało zwiększeniem podatności mieszanki na zagęszczanie.

2. Zwiększenie zawartości wycierki w mieszance ze otrębami owsianymi z 10 do 20% spowodowało wzrost nacisków zagęszczających około 123% przy temperaturze 50°C (z 3,72 do 8,30 MPa) i aż o około 248% przy temperaturze 90°C (z 2,66 do 9,26 MPa), przy jednoczesnym znacznym wzroście gęstości otrzymanego granulatu o około 15,5% przy 50°C (z 719,11 do 840,94 kg·m<sup>-3</sup>) i o około 14% przy temperaturze 90°C (z 790,94 do 920,95 kg·m<sup>-3</sup>).

3. Uzyskane wartości gęstości granulatu z mieszanki wycierki i otrębów owsianych (ponad 900 kg·m<sup>-3</sup>) przy zawartości wycierki 20% i temperaturach powyżej 70°C pozwoliły na stwierdzenie, że uzyskany granulat ma zadowalającą jakość i stanowi pełnowartościowe paliwo stałe (zgodnie z istniejącymi normami dotyczącymi granulatu drzewnego w krajach europejskich).

4. Wyniki badań pozwoliły na wstępne określenie parametrów realizacji procesu zagęszczania w układzie roboczym granulatora z układem „płaska matryca – rolki zagęszczające” oraz na opracowanie szczegółowej technologii wytwarzania granulatu opałowego (paszowego) z udziałem wycierki ziemniaczanej, czego owocem było zgłoszenie patentowe autora.

## PIŚMIENNICTWO

- Dziki D., Laskowski J., Siastała M., Biernacka B., 2010. Influence of moisture content on the wheat kernel mechanical properties determined on the basis of shear test. *Int. Agrophysics*, 24, 237-242.
- EN 14961-1 (PN-EN 14961-1:2010). Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne.
- Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J., Høibø O., 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3342-3349.
- Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F., 2010. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion, *Bioresource Technology*, 101, 5601-5608.
- Gil M.V., Oulego P., Casal M.D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F., 2010a. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends, *Bioresource Technology*, 101, 8859-8867.
- Gluba T., Obraniak A., 2008. Evaluation of the homogeneity of wet drum granulation product. *The Chemical Industry*, 87(2), 125-128.
- Hejft R., 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE Radom.
- Hiegl W., Janssen R., Pichler W., 2009. Advancement of pellets-related European standards. *WIP Renewable Energies*.
- Hryniewicz M., Bębenek M., Gara P., 2008. Problem of roll press compacting unit selection to consolidate material in two-stage granulation process. *Chemik – Science, Technique Market*, Vol. 9, R. 61, 425-428.
- Kaliyan N., Morey R.V., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenerg.*, 33, 337-359.
- Kulig R., Skonecki S., 2011. Wpływ wilgotności na parametry procesu zagęszczania wybranych roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, 17(2), 335-344.
- 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.
- Miranda T., Arranz J.I., Montero I., Román S., Rojas C.V., Nogales S., 2012. Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets, *Fuel Processing Technology* 103, 91-96.
- Moran J.C., Miguez J.L., Porteiro J., Patiño D., Granada E., Collazo J., 2009. Study of the feasibility of mixing refuse derived fuels with wood pellets through the grey and Fuzzy theory. *Renewable Energy* 34, 2607-2612.
- Obidziński S., 2009. Badania procesu zagęszczania wycierki ziemniaczanej. *Acta Agrophysica*, 14(2), 383-392.
- Obidziński S., 2010. Ocena właściwości energetycznych wycierki ziemniaczanej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 58-62.
- Obidziński S., 2012. Pelletization process of postproduction plant waste. *Int. Agrophysics*, 26(3), 2012, 279-284.
- Obidziński S., 2012a. Granulat opałowy i paszowy i technologia jego wytwarzania. Zgłoszenie patentowe P.398399 z dnia 12.03.2012r. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.
- Obraniak A., Gluba T., 2011. A model of granule porosity changes during drum granulation, *Physico-chemical Problems of Mineral Processing*, 46, 219-228.
- Poskrobko S., Łach J., Król D., 2010. Research of calorimetric properties of some selected industrial wastes and fuels formed from wastes (in Polish), *Energetyka*, 3(669), 63, 633-640.

- 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.
- Shaw M., 2008. Feedstock and process variables influencing biomass densification. A Thesis. Department of Agricultural and Bioresource Engineering. University of Saskatchewan. Saskatoon. Saskatchewan, Canada.
- Skonecki S., Potręć M., 2010. Wpływ wilgotności na ciśnieniowe zagęszczanie biomasy roślinnej. *Zesz. Probl. Postępów Nauk Roln.*, 546, 341-346.
- Stahl M., Berghel J. 2011. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. *Biomass and Bioenergy*, 35, 4849-4854.
- Stolarski M., 2006. Wykorzystanie biomasy do produkcji pelet. *Czysta Energia* 55/2006, 28.
- Wach E., 2005. Właściwości granulatu drzewnego. *Czysta Energia*, 6/2005 (44).
- Wandrasz J.W., Wandrasz A., 2006. Formed fuels, Seidel-Przywecki, Warsaw.

## EVALUATION OF THE PRODUCTION PROCESS OF FUEL PELLETS FROM OAT BRAN WITH POTATO PULP CONTENT

*Sławomir Obidziński*

Department of Agricultural and Food Techniques  
Faculty of Mechanical Engineering, Białystok University of Technology  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok  
e-mail: obislaw@pb.edu.pl

**Abstract.** The aim of the research described in the paper was to determine the best possible parameters of densification process of mixtures of oat bran and potato pulp that would allow the preparation of the technology of production of fuel (fodder) pellets from those wastes. The research was performed on a work stand SS-3, with an “open densification chamber-densification piston” working system, using an open chamber with the diameter of 8 mm and length  $l_o = 47$  mm. During the research the influence of the content of potato pulp ( $z_w = 10\%$ ,  $20\%$  and  $30\%$ ) in the mixture of potato pulp and oat bran and of the densification process temperature ( $t_p = 50$ ,  $70$  and  $90^\circ\text{C}$ ) on the course of the process (maximum densification pressure obtained during the densification process) and on the density of the produced pellets was determined. The research results made it possible to conclude that the most favourable addition of potato pulp to oat bran, from the viewpoint of the pellets quality, is 20 % addition which allows to obtain satisfactory density of pellets (above  $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Such density of the pellets produced makes them a valuable and balanced solid fuel. The results of the research allowed to determine the preliminary identification of parameters of the realization of the densification process in a pellet mill with a ‘flat die – compacting rollers’ working system. The performed research allowed also to formulate detailed directives for production technologies of fuel and fodder pellets, which resulted in the submission of a patent application by the author of the present paper.

**Key words:** pellets, fodder, oat bran, potato pulp, densification pressure, pellets quality