

Dr inż. Sławomir OBIDZIŃSKI  
 Inż. Marcin KOBYLŃSKI  
 Dr inż. Dorota DEC  
 Zakład Inżynierii Rolno-Spożywczej i Leśnej  
 Dr Jolanta PIEKUT  
 Zakład Chemii

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka

## BADANIA PROCESU BRYKIETOWANIA MIESZANIN MATERIAŁÓW ODPADOWYCH POCHODZENIA ROŚLINNEGO®

The investigation of the briquetting process of mixtures  
 of the plant waste materials®

*Praca wykonana w ramach pracy statutowej S/WbiIS/5/2014*

**Słowa kluczowe:** brykietowanie, odpady roślinne, mieszanki odpadów, jakość brykietu.

*W pracy przedstawiono wyniki badań procesu brykietowania trocin sosnowych i mieszanin trocin sosnowych z odpadami rolno-spożywczymi (słomy, otrębów pszennych oraz makulatury) z jednoczesnym określeniem jakości uzyskanego produktu. Jakość otrzymanych brykietów oznaczano poprzez wyznaczenie maksymalnej siły rozkruszania brykietu. Badania procesu brykietowania zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym, którego głównym elementem jest brykietciarka tłokowa, wytwarzająca brykiet o średnicy 28 mm. Badania wykazały, że rodzaj brykietowanego materiału istotnie wpływa na zapotrzebowanie na moc występujące przy realizacji procesu brykietowania oraz na wytrzymałość otrzymanego brykietu.*

**Key words:** briquetting, plant waste, waste mixture, briquette quality.

*The paper presents the results of investigations the briquetting process of pine sawdust and mixtures of pine sawdust and agri-food waste (in the form of straw, wheat bran and waste paper) with simultaneous determination of the quality of the obtained product. The quality of the briquettes were determined by designating the maximum force crushing briquettes. Briquetting process was carried out on the research stand, whose main element is the piston briquetting, producing briquettes with a diameter of 28 mm. The study showed that the type of briquetted material has a significant impact on the energy consumption of briquetting machine occurring in the implementation of briquetting process and on the strength of the obtained briquettes.*

### WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się rozwój metod brykietowania i granulowania z wykorzystaniem tych technologii zarówno w przemyśle paszowym, w energetyce jak i w przemyśle rolno-spożywczym.

Według Hejfta i Demianiuka [3, 6, 7] do zalet brykietów można zaliczyć: możliwość ich spalania we wszystkich typach pieców, podobieństwo kinetyki ich spalania do spalania kawałków drewna (polan), parokrotnie większą gęstość brykietów w porównaniu z wiórami i trocinami (istotnie mniejsza powierzchnia ich magazynowania oraz koszty transportu), większe bezpieczeństwo spalania w porównaniu ze spalaniem paliw sypkich (spalanie nie grozi wybuchem) oraz możliwość eksportowania ich jako ekologicznego paliwa stałego, po cenie wyższej niż węgla itd.

Jak podaje Hejft [8], w formę brykietu opałowego najczęściej zamieniane są drzewne materiały odpadowe średnie (wióry) i małe (trociny, pyły ze szlifowania drewna). Z powodu niedoboru surowca drzewnego w postaci trocin, wiórów czy pyłów drzewnych, w ostatnich latach obserwuje się

poszukiwania innych surowców w tym odpadowych pochodzenia roślinnego jako alternatywy dla surowców drzewnych, przydatnych do wytwarzania brykietów. Do postaci brykietów zamieniane są: słoma rzepakowa, słoma pszenna, siano łąkowe oraz łodygi ślazu [14], kukurydzy pastewnej [15, 16], kukurydzy i traw [10, 11, 12], słomy i łuski ryżowej [2, 4, 13]. Adamczyk [1] i Fiszer [5] prowadzili badania procesu brykietowania słomy metodą zwijania.

Jako surowce do wytwarzania brykietów wykorzystywane są również różnego rodzaju odpady spożywcze m.in.: odpady pozostałe przy produkcji bananów [18, 20], odpady powstałe przy produkcji oliwy [21].

Stolarski i współpracownicy [19], wytwarzali i oceniali jakość brykietów m.in. z mieszaniny słomy i makuchów rzepakowych, tj. odpadów powstałych po wyłaczaniu oleju z rzepaku.

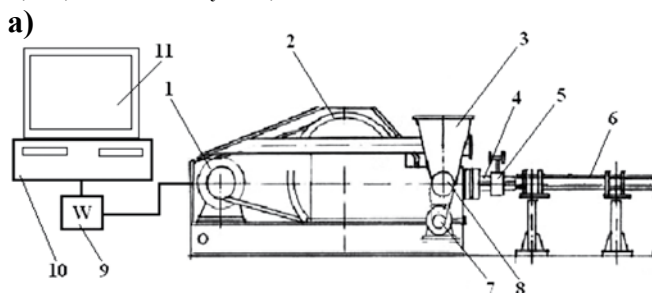
**Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań dotyczących wpływu rodzaju dodatku odpadu roślinnego do trocin sosnowych na energochłonność procesu brykietowania oraz na jakość uzyskanego brykietu.**

## MATERIAŁ I METODYKA BADAWCZA

W artykule zaprezentowano wyniki badań procesu brykietowania trocin sosnowych (T) oraz mieszanin trocin sosnowych z 20% dodatkiem otrębów pszennych (TO), słomy owsianej (TS) i rozdrobnionej makulatury (TM). Wykorzystane do badań otręby pszenne zostały wyprodukowane w wytwórni pasz „Farmpasz” w Makówce. Słoma owsiana pochodziła z prywatnego gospodarstwa rolnego z okolic Łomży, natomiast makulatura wykorzystana do badań została otrzymana po rozdrobieniu czarno-białych gazet.

Odpady w postaci kostek słomy oraz gazet papierowych poddano procesowi rozdrobnienia, za pomocą rozdrabniacza bijakowego typu „Bąk” H-111/1, z wykorzystaniem sita o średnicy oczek 5 mm. Rozdrobnione i odważone w odpowiednich proporcjach odpady były mieszane i następnie przetrzymywane w szczelnych pojemnikach. Po upływie 24 godzin zostały jeszcze raz zmieszane i wsypane do zbiornika zasypowego brykieciarki.

Poddane zagęszczaniu trociny posiadały wilgotność 7,8%, a mieszaniny trocin z: otrębami – 11,2%, ze słomą – 8,3%, z makulaturą – 10,1%.



**Rys. 1. Stanowisko do badania procesu brykietowania:**  
 a) schemat stanowiska: 1 – silnik elektryczny, 2 – koło zamachowe, 3 – zbiornik zasypowy, 4 – tuleja zagęszczająca, 5 – zacisk tulei, 6 – tor stabilizacyjny, 7 – silnik z motoreduktorem, 8 – podajnik ślimakowy, 9 – watomierz, 10 – rejestrator, 11 – komputer PC.

b) widok brykieciarki w trakcie pracy.

**Fig. 1. The stand for investigation of the briquetting process:**  
 a) diagram of the stand: 1 – electric motor, 2 – flywheel, 3 – hopper tank, 4 – densification sleeve, 5 – clamp of sleeve, 6 – stability track, 7 – engine with a gear motor, 8 – screw feeder, 9 – wattmeter, 10 – recorder, 11 – computer.  
 b) view of the briquetting machine during the work.

**Źródło:** Fotografia i opracowanie własne  
**Source:** The picture and own study

W trakcie badania każdorazowo zagęszczano próbki mieszanki o masie 5 kg. Dla każdej mieszanki wykonano po trzy próby zagęszczania.

Badania procesu brykietowania zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym (przedstawionym na rys. 1), którego głównym elementem jest brykieciarka tłokowa (rys. 1a), wytwarzająca brykiet cylindryczny o średnicy 28 mm.

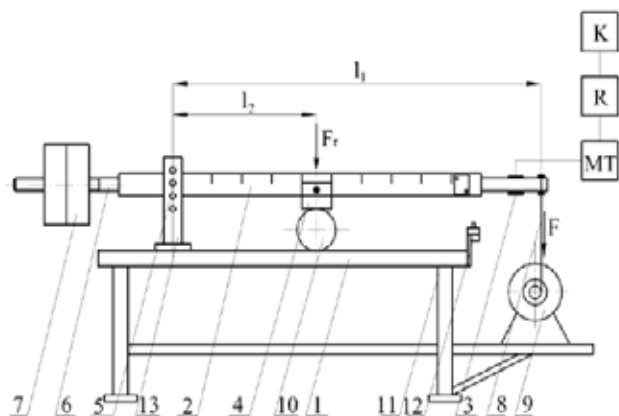
Zagęszczany surowiec zasypywano do zbiornika zasypowego 3, z którego podawany był za pomocą podajnika ślimakowego 8 (napędzanego silnikiem elektrycznym 7 z motoreduktorem) do komory zagęszczania 4. Elementem roboczym zagęszczającym brykieciarki jest stempel zagęszczający zamocowany na korbowodzie i napędzany kołem zamachowym 2. Napęd na koło zamachowe 2 jest przenoszony z silnika elektrycznego 1 poprzez przekładnię pasową i wał korbowodowy. W komorze zagęszczającej tłok zagęszczający przesuwają zagęszczany materiał do tulei zagęszczającej 5. W trakcie pracy stempel 3 pracuje z dużą częstotliwością (150 ÷ 250 cykli na minutę), ruchem posuwisto-zwrotnym. W tulei zagęszczającej materiał, z każdym uderzeniem stempla przesuwany jest skokowo i poddawany cyklicznie wysokim naciskom dochodzącym do 200 MPa. Po wyjściu brykietu z komory zagęszczającej jest on kierowany na specjalny dwumetrowy tor stabilizujący 6, gdzie brykiet ostatecznie zostaje schłodzony i uzyskuje pożądaną wytrzymałość. Długość otrzymywanego brykietu może być regulowana dodatkowymi elementami tnącymi.

W trakcie procesu brykietowania dokonywano pomiaru zapotrzebowania na moc silnika 1, napędzającego brykieciarkę, z wykorzystaniem miernika (watomierza) 9, a sygnały doprowadzono do rejestratora 10. Pliki z danymi w postaci binarnej poddano dalszej obróbce w programie Excel i Statistica 10.0PL.

Wilgotności składników mieszanek oraz mieszanek badanych odpadów oznaczono zgodnie z PN-EN 14774-1:2010 [17], 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.

Jakość otrzymanych brykietów oznaczano poprzez wyznaczenie maksymalnej siły rozkruszania brykietu na jego powierzchni bocznej, na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 2 oraz w pracach [3, 9].

Na płycie podstawy 1 ustawiono stojak 13 do mocowania ułożyskowanej listwy pomiarowej 2, która może być zakładana w różnych odległościach od płyty podstawy 1. Na wyskalowanej listwie (podziałka z dokładnością do 1mm) umocowano przeciwpróbkę 4, z możliwością jej przesuwania. Na końcu listwy 2 umocowano płytkę pomiarową 3 z uchwytem na cięgno. Na płycie pomiarowej naklejone zostały tensometry w układzie pełnego mostka pomiarowego. Na drugim końcu listwy przyspawano pręt gwintowany 6, na który nakręcono dwa obciążniki stanowiące przeciwagę 7 dla ramienia 1 listwy 2. Na półce ramy 11 ustawiono motoreduktor 9. Prędkość liniowa przesuwania się cięgna 8 wynosiła 0,01 m/min. W celu zabezpieczenia płytki pomiarowej przed zniszczeniem zamontowano na płycie podstawy wyłącznik krańcowy 12. Przewody z tensometrów połączono z kanałem

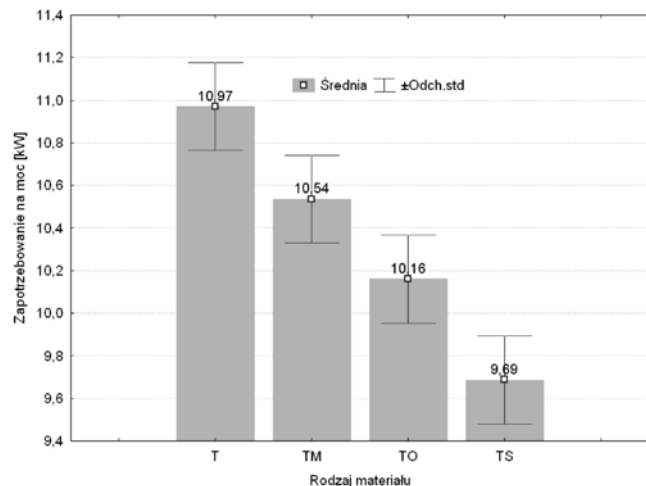


Rys. 2. Schemat stanowiska do pomiaru siły rozkruszania na powierzchni bocznej brykietu [3;9]: 1 – płyta podstawy, 2 – listwa pomiarowa, 3 – płytka pomiarowa, 4 – przeciwpróbka, 5 – ułożyskowana oś obrotu listwy, 6 – pręt gwintowany, 7 – przeciwwaga, 8 – cięgno, 9 – motoreduktor, 10 – brykiety, 11 – rama stanowiska, 12 – wyłącznik krańcowy, 13 – stojak.

Fig. 2. The scheme of the crushing force measurement on the side surface of the briquette [Demjanjuk 2001]: 1 – base plate 2 – measuring strip, 3 – measuring plate, 4 – countersample, 5 – journalled axis of strip rotation, 6 – threaded rod, 7 – counterweight, 8 – rope, 9 – gear motor, 10 – briquette, 11 – frame of the stand, 12 – limit switch, 13 – rack.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 3. Zależność zapotrzebowania brykietarki na moc od rodzaju brykietowanego surowca.

Fig. 3. Dependence of energy consumption of briquetting machine from the type of briquetted material.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

mostka tensometrycznego (MT), a następnie z rejestratorem wielokanałowym typu Spider (R). Wyniki pomiarów rejestrowano za pomocą komputera (K).

## WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań procesu brykietowania, tj. wpływu rodzaju brykietowanej mieszanki na wartości zapotrzebowania na moc silnika napędzającego brykietciarkę oraz na maksymalną siłę rozkruszającą brykiety otrzymane z trocin sosnowych oraz z mieszanin trocin sosnowych z różnymi odpadami pochodzenia roślinnego.

Tabela 1. Wyniki badań procesu brykietowania trocin oraz mieszanin trocin z różnymi odpadami pochodzenia roślinnego

Table 1. Results of investigation the briquetting process of sawdust and mixtures of sawdust with different plant waste

Zagęszczony odpad	Wilgotność mieszaniny [%]	Zapotrzebowanie na moc [kW]	Maksymalna siła rozkruszająca brykiety [N]
Mieszanina trocin i słomy	11,2	9,69	110,00
Mieszanina trocin i makulatury	8,3	10,54	256,33
Mieszanina trocin i otrębów pszennych	10,1	10,16	176,67
Trociny	7,8	10,97	364,69

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Na rys. 3 przedstawiono otrzymane w trakcie badań wyniki zapotrzebowania na moc w zależności od rodzaju brykietowanego materiału.

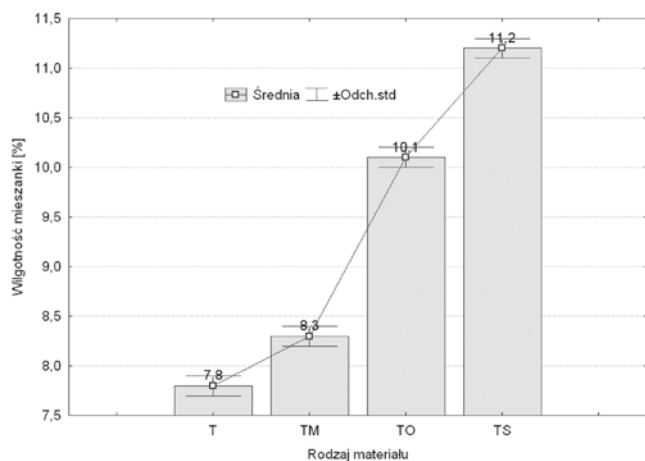
Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań brykietowania mieszanek trocin sosnowych i odpadów rolnospożywczych (tab. 1, rys. 3) można stwierdzić, że rodzaj brykietowanego materiału istotnie wpływa na zapotrzebowanie na moc potrzebną do realizacji tego procesu. Przeprowadzona jednoczynnikowa analiza wariancji (jednowymiarowy test istotności Kołmogorowa-Smirnowa) na poziomie istotności  $P=0,05$  wykazała istotne różnice pomiędzy wartościami zapotrzebowania na moc brykietarki otrzymanymi podczas brykietowania różnego rodzaju materiałów.

Największe zapotrzebowanie na moc brykietarki, wynoszące 10,97 kW, zanotowano przy brykietowaniu trocin sosnowych bez żadnych dodatków. Najmniejsze zapotrzebowanie na moc, które wynosiło 9,69 kW, zanotowano przy brykietowaniu mieszaniny trocin ze słomą. Mieszaniny trocin sosnowych i makulatury zbrykietowano przy zapotrzebowaniu na moc 10,54 kW, a trocin sosnowych i otrębów pszennych przy zapotrzebowaniu 10,16 kW.

Na uzyskane wartości zapotrzebowania na moc pewien wpływ miała wilgotność mieszanek poddanych brykietowaniu (tab. 1 i rys. 4).

Materiały takie jak słoma, otręby czy makulatura miały porównywalną wilgotność około 11%, natomiast trociny sosnowe wilgotność około 7,8%, co miało również wpływ na największe wartości zapotrzebowania na moc przy ich brykietowaniu.

Na rys. 5 przedstawiono otrzymane w trakcie badań wyniki siły rozkruszającej brykiety.

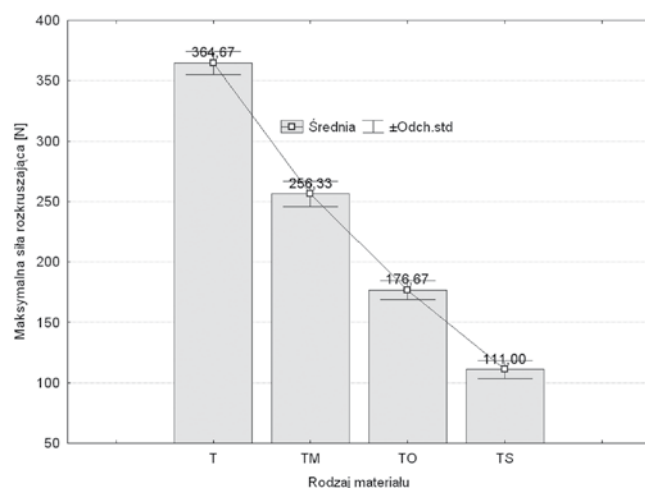


Rys. 4. Wilgotność brykietowanego surowca.

Fig. 4. Moisture content of briquetted material.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 5. Zależność maksymalnej siły rozkruszającej brykiet od rodzaju brykietowanego surowca.

Fig. 5. Dependence of the maximum force crushing the briquette from the type of briquetted material.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

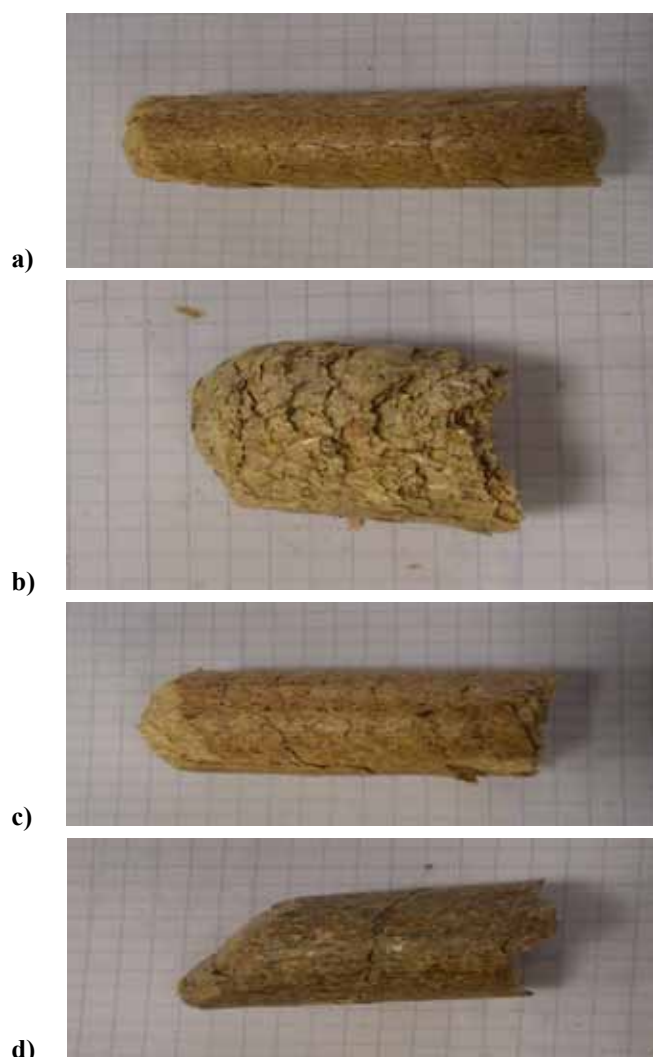
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań pomiaru siły rozkruszania na powierzchni bocznej brykietów otrzymanych z trocin sosnowych oraz mieszanek trocin sosnowych i odpadów rolno-spożywczych można stwierdzić, że rodzaj brykietowanego materiału istotnie wpływa na wartość siły rozkruszającej brykiet. Przeprowadzona jednoczynnikowa analiza wariancji (jednowymiarowy test istotności Kołmogorowa-Smirnowa) na poziomie istotności  $P=0,05$  pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic pomiędzy wartościami siły rozkruszającej brykiet, otrzymanych przy różnych rodzajach brykietowanego materiału.

Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 5 i tabela 1) można zauważyć, iż brykiet wyprodukowany z samych trocin sosnowych bez dodatków innych odpadów posiadał największą wytrzymałość na rozkruszanie na powierzchni bocznej (siła rozkruszająca brykiet wyniosła 365 N). Spowodowane to było zawartością żywicy w składzie trocin, która stanowi naturalne lepiszcze pozwalające na trwałe łączenie części w brykiecie. Pomimo, iż brykiet z trocin był najbardziej

odporny na rozkruszanie, to jednak jego wyprodukowanie wiązało się z największym poborem mocy przez brykietarkę - 10,97 kW (tab. 1).

Najniższą wytrzymałością na rozkruszanie na powierzchni bocznej (siła rozkruszająca 110 N), charakteryzował się brykiet powstały z mieszaniny trocin sosnowych i słomy. Także zapotrzebowanie na moc przy jego wytworzeniu było najniższe i wynosiło tylko 9,69 kW. Brykiet ten po wyjściu z matrycy rozwarstwiał się oraz następowało złuszczenie jego warstwy zewnętrznej. Może to być spowodowane faktem, że dodatek słomy do trocin sosnowych zmniejszył współczynnik tarcia pomiędzy zagęszczanym odpadem a powierzchnią tulei zagęszczającej.

Na rys. 6 przedstawiono widok brykietów otrzymanych z trocin sosnowych oraz z mieszaniny trocin sosnowych i badanych odpadów.



Rys. 6. Widok brykietów z: a) trocin sosnowych, b) mieszaniny trocin sosnowych i słomy owsianej, c) mieszaniny trocin sosnowych i otrębów pszennych, d) mieszaniny trocin sosnowych i makulatury.

Fig. 6. The view of the briquette from: a) pine sawdust, b) a mixture of pine sawdust and wheat bran, d) a mixture of pine sawdust and waste paper.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Rodzaj brykietowanego materiału istotnie wpływa na zapotrzebowanie na moc, występujące przy realizacji procesu brykietowania oraz na wytrzymałość otrzymanego brykietu.
2. Najlepszy jakościowo brykiet został wyprodukowany z trocin sosnowych, bez żadnych dodatków. Siła potrzebna do jego rozkruszenia wyniosła 365 N. Zapotrzebowanie na moc brykietarki było jednak największe i wyniosło 10,97 kW.
3. Brykiet powstały z mieszaniny trocin sosnowych i słomy charakteryzował się najniższą wytrzymałością na rozkruszanie (siła rozkruszająca 110 N), jak również zapotrzebowanie brykietarki na moc przy jego wytworzeniu było najmniejsze i wynosiło tylko 9,69 kW.
4. Uzyskane brykiety (z wyjątkiem brykietów w mieszaninie ze słomą), mogą być z powodzeniem wykorzystywane jako pełnowartościowe paliwo stałe, a dzięki swojej małej średnicy mogą być spalane w piecach z podajnikami (podobnie jak granulatu).

## LITERATURA

- [1] **ADAMCZYK F. 2010.** *Wpływ wilgotności słomy zbóżowej na stopień zagęszczenia uzyskiwanych brykietów.* Inżynieria Rolnicza, 1(119), 7-13.
- [2] **AMAYA A., MEDERO N., TANCREDI N., SILVA H., DEIANA C. 2007.** *Activated carbon briquettes from biomass materials.* Biosource Technology, 98, 1635-1641.
- [3] **DEMIANIUK L. 2001.** Brykietowanie rozdrobnionych materiałów roślinnych. Praca doktorska. Politechnika Białostocka.
- [4] **CHOU C. S., LIN S. H., PENG C. C., LU W. C. 2009.** *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.
- [5] **FISZER A. 2008.** *Badania porównawcze współczynnika trwałości brykietów ze słomy.* Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, Vol. 53 (3), 69-70.
- [6] **HEJFT R. 1995.** Wpływ nacisków prasujących na gęstość brykietów z pasz słomianych, formowanych w komorach zamkniętych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn. Zeszyt 3, 43-50.
- [7] **HEJFT R., DEMIANIUK L. 1999.** Wytwarzanie brykietów opałowych z odpadowych surowców pochodzenia roślinnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, nr 27, 123-130.
- [8] **HEJFT R. 2000.** Wykorzystanie odpadów pochodzenia roślinnego do celów energetycznych. Materiały konferencyjne: „Recyklacja odpadów IV”, 165-174. Ostrawa 2000.
- [9] **HEJFT R. 2002.** Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE. ISBN 83-7204-251-9.
- [10] **KARUNANITHY C., WANG Y., MUTHUKUMARAPPAN K., PUGALENDHI S. 2012.** *Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks.* Biotechnology Research International, Volume 2012, 12 pages, DOI: 10.1155/2012/165202.
- [11] **KALIYAN N., MOREY R. V., WHITE M. D., DORRING A. 2009.** *Roll press briquetting and pelleting of corn stover and switchgrass.* Trans ASABE, 52(2), 543-555.
- [12] **KALIYAN N., MOREY V., SCHMIDT D. R. 2013.** *Roll press compaction of corn stover and perennial grasses to increase bulk density.* Biomass and Bioenergy, 55, 322-330.
- [13] **NDIEMA C. K. W., MANGA P. N., RUTTOH C. R. 2002.** *Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass.* Energy Conversion and Management, 43, 2157-2161.
- [14] **NIEDZIÓŁKA I., SZYMANEK M., ZUCHNIARZ A. 2008.** *Ocena trwałości brykietów wytworzonych z masy roślinnej kukurydzy pastewnej.* Inżynieria Rolnicza, 9(107), 235-240.
- [15] **NIEDZIÓŁKA I., SZPRYNGIEL M., KRASZKIEWICZ A., KACHEL-JAKUBOWSKA M. 2011.** *Ocena wydajności brykietowania oraz jakości brykietów wytworzonych z wybranych surowców roślinnych.* Inżynieria Rolnicza, 6(131), 149-155.
- [16] **OLADEJI J. T. 2010.** *Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues.* The Pacific Journal of Science and Technology, 11, 101-106.
- [17] **PN-EN 14774-1: 2010.** *Biopaliwa stałe. Oznaczenie zawartości wilgoci. Metoda suszarkowa. Część 1: Wilgoć całkowita. Metoda referencyjna.*
- [18] **SELLIN N. 2014.** *Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste.* Chemical Engineering Transactions, Vol. 37, 439-444.
- [19] **STOLARSKI M.J., SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J., KRZYŻAANIAK M., GULCZYŃSKI P., MLECZEK M. 2013.** *Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass.* Renewable Energy, 57, 20-26.
- [20] **WILAIPOON P. 2007.** *Physical characteristics of maize cob briquette under moderate die pressure.* American Journal of Applied Sciences, 4, n.12, 995-998.
- [21] **YAMAN S., SAHAN M. H., SESEN K. H., KUCUKBAYRAK S. 2000.** *Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste.* Fuel Processing Technology, 68, 23-31.