

## *Evaluation of the possibility of pelleting selected herbaceous biomass with the addition of kaolin and urea solution*

# Ocena możliwości peletowania wybranej biomasy zielonej z dodatkiem kaolinu i roztworu mocznika



DOI: 10.15199/62.2024.10.13

*The by-product of cleaning English ryegrass or chamomile was mixed with kaolin and/or an aq. urea soln. in 5% shares. The mixts. were granulated at a raw material moisture content of 16 or 20%. Pellets with the desired quality characteristics were obtained. An increase in the raw material moisture content from 16 to 20% in most of the analyzed characteristics resulted in a deterioration of the agglomerate properties, which to some extent compensated for lower energy consumption in the process. The addn. of 5% kaolin to the herbaceous biomass resulted in a decrease in the agglomerate d., mech. strength, an increase in ash content, but also a decrease in the energy consumption of the process by approx. 50%. Hence, it is recommended to verify the analyzed features of the produced solid biofuels by taking into account the effect of additives used in the combustion process in low-power heating devices.*

**Keywords:** formed biofuels, green ryegrass, chamomile

Przedstawiono możliwość peletowania biomasy zielonej z dodatkiem kaolinu i roztworu mocznika. Do badań wykorzystano produkt uboczny po czyszczeniu rajgrasu angielskiego oraz rumianku w mieszankach z komponentami w postaci glinki porcelanowej (kaolinu) i 10-proc. roztworu mocznika, w 5-proc. udziałach. Proces granulacji prowadzony był na matrycy o grubości 28 mm i średnicy otworów 8 mm przy zawartości wilgoci w surowcach 16 lub 20%. Wykorzystane produkty uboczne w analizowanych mieszankach umożliwiały wytworzenie peletów o pożądanym poziomie jakościowym. Zwiększenie wilgotności surowców z 16 do 20% w większości analizowanych cech powodowało pogorszenie właściwości aglomeratu, co w pewnym stopniu rekompensowało nieznaczne zmniejszenie energochłonności procesu. Dodatek do analizowanych surowców 5% glinki porcelanowej powodował zmniejszenie gęstości aglomeratu, trwałości mechanicznej, wzrost zawartości popiołu, ale zmniejszenie o ok. 50% energochłonności procesu. Rekomenduje się weryfikację analizowanych cech wytworzonych biopaliw stałych poprzez uwzględnienie wpływu stosowanych dodatków na proces ich spalania w urządzeniach grzewczych małej mocy.

**Słowa kluczowe:** biopaliwa formowane, rajgras angielski, rumianek

W Unii Europejskiej promowane jest pozyskiwanie coraz większych ilości energii elektrycznej z biomasy, która jest najbardziej rozpowszechnionym odnawialnym źródłem energii. Z definicji obejmuje ona wszystkie substancje pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, które ulegają biodegradacji. Całkowita produkcja biomasy jest 8-krotnie większa niż roczne globalne zużycie wszystkich innych źródeł energii oraz zajmuje 4. miejsce pod względem poten-

cjału po węglu, ropie naftowej i gazie ziemnym. Do 2030 r. zapotrzebowanie na biomasę może wynieść 10–18 mln t. Jednocześnie przewiduje się, że do 2040 r. to źródło będzie generować jedną trzecią globalnej mocy energii. Biomasa jest uważana za krajowy surowiec energetyczny, a jej dostępność czyni ją niezależną od wahań cen i niepewności dostaw w odniesieniu do importowanych kopalnych paliw stałych, ciekłych i gazowych<sup>1–5</sup>.



Mgr inż. Małgorzata DULA (ORCID: 0000-0001-9239-1157) w roku 2009 ukończyła studia z zakresu ochrony środowiska na Wydziale Biologii i Hodowli Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Obecnie jest doktorantką na tej samej uczelni. Specjalność – wykorzystanie biopaliw formowanych.



Dr hab. inż. Artur KRASZKIEWICZ (ORCID: 0000-0002-8031-0046) w roku 2003 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Produkcji Akademii Rolniczej w Lublinie (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie). Na tym samym wydziale w 2008 r. uzyskał stopień doktora, a w 2017 r. stopień doktora habilitowanego nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelni w Zakładzie Eksploatacji Maszyn Rolniczych i Urządzeń Ekoenergetycznych UP w Lublinie. Specjalność – odnawialne źródła energii, ekoenergetyka.

\* Adres do korespondencji:

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, tel.: (81) 531-97-31, fax: (81) 531-97-29, e-mail: artur.kraszkiewicz@up.lublin.pl

Obiecującą alternatywą dla zastąpienia ograniczonej dostępności wysokiej jakości biomasy drzewnej jest biomasa zielna. Termin biomasa zielna obejmuje jednoroczne i dwuletnie rośliny zielne, ale także trawy, byliny, rośliny okopowe i strączkowe, ziarna i ich produkty uboczne (produkty zbożowe). W grupie biomasy zielnej zauważalna jest biomasa z plantacji ziół, które zajmują w Polsce powierzchnię ponad 30 tys. ha, a w krajach UE powierzchnia uprawy roślin zielarskich stanowi ok. 80 tys. ha. W kontekście dostępności tej biomasy oczekuje się wzrostu jej wykorzystania<sup>6, 7</sup>. Duża ilość takiej biomasy ubocznej powstaje w miejscu produkcji, podczas zbioru plonu głównego, wstępnej obróbki, suszenia oraz w zakładach przetwarzających surowce zielarskie. Znaczna dostępność tych surowców stwarza możliwość ich zagospodarowania na cele energetyczne, co zmniejsza ich utylizowanie poprzez spalanie w gospodarstwie na polu. Ponadto wykorzystanie paliwa z biomasy produkowanej z lokalnych surowców pozwala także na dywersyfikację źródeł energii, co jest obecnie działaniem pożądanym<sup>7-10</sup>.

W Polsce z tej grupy biomasy zielnej popularne są uprawy traw nasiennych i rumianku. Rumianek (*Matricaria chamomilla*) jest cenną rośliną z rodziny *Compositae* i często jest zwany rumiankiem niemieckim. W Polsce uprawiany jest na powierzchni 1000–1200 ha, przy czym najwięcej na Lubelszczyźnie. W normalnych warunkach glebowych plon rumianku może wynosić ok. 6,0 t/ha świeżych kwiatów lub 1,0–1,5 t/ha suchych główek kwiatowych, podczas gdy na glebach zasolonych i alkalicznych plon może wynosić 3,75 t/ha świeżych główek kwiatowych<sup>11-15</sup>. Popularną trawą w Polsce jest życica trwała, zwana rajgrasem angielskim (*Lolium perenne* L.). Życica trwała rośnie szybko i bardzo dobrze się krzewi, dlatego też jest gatunkiem konkurencyjnym dla innych traw. Daje dużą masę zieloną, łatwo schnie i szybko odrasta po skoszeniu. Biomasa ta cechuje się nie tylko wysoką produktywnością, lecz także podobną do innych rodzajów biomasy kalorycznością, co jest istotne przy jej spalaniu. Skład surowców zielnych obejmuje polimery węglowodanowe, takie jak celuloza i hemiceluloza, polimery fenolowe (lignina) oraz takie składniki, jak białka, kwasy, sole i minerały. Stosunek celulozy do ligniny (5–25%) w materiałach zielnych, takich jak trawa, jest znacznie wyższy niż w materiałach drzewnych. Ich ilość jest zróżnicowana nawet w obrębie gatunku i zależy m.in. od dojrzałości rośliny. W roślinach trawiastych typowo

udział tych związków wynosi: 41,7% celulozy, 35,8% hemicelulozy i 8,0% ligniny<sup>16, 17</sup>.

Istotne jest, że aby zweryfikować przydatność biomasy jako surowca do produkcji energii, należy określić jej skład chemiczny, który jest oznaczany na poziomie związków chemicznych lub jako składniki elementarne, pierwiastkowe. Skład chemiczny rośliny różni się w zależności od gatunku, stadium rozwoju (dojrzałości) oraz warunków środowiskowych. Natomiast zróżnicowanie cech chemicznych poszczególnych surowców roślinnych w literaturze opisywane jest najczęściej za pomocą składu elementarnego C, H, N, O i Cl<sup>18-26</sup>.

Dodatkowo od strony cech technicznych biomasa zielna jest stosunkowo trudnym w użytkowaniu paliwem, wskutek czego wymaga odpowiedniego przetworzenia. W porównaniu z innymi nośnikami energii jest paliwem niejednorodnym o małej gęstości nasykowej, często o dużej zawartości wody i o małej wartości energetycznej w odniesieniu do jednostki objętości. Dlatego też zachodzi konieczność jej zagęszczenia, np. do postaci peletów w wyniku działania ciśnienia oraz podwyższonej temperatury. Na pożądane parametry aglomeratu mają wpływ takie czynniki, jak wilgotność i skład chemiczny materiału, stopień jego rozdrobnienia, temperatura procesu, właściwości dodatków poprawiających cechy peletu oraz parametry urządzeń zagęszczających<sup>27-34</sup>.

Biomasa zielna w porównaniu z biomasą drzewną charakteryzuje się zwykle większą zawartością krzemu i metali alkalicznych uznawanych za główny czynnik sprzyjający niskim temperaturom topnienia popiołu, co zwiększa ryzyko żużlowania i powstawania osadów na powierzchniach konwekcyjnych urządzenia grzewczego<sup>35</sup>. Dlatego też jednym ze sposobów poprawy właściwości peletów oraz parametrów emisyjno-cieplnych przy spalaniu takiej biomasy powinno być stosowanie dodatków przeciw spiekaniu się popiołów. Takie dodatki powinny być przyjazne dla środowiska i łatwe w zastosowaniu, a poprzez zmianę składu chemicznego popiołów przekształcać je do bezpiecznej formy. W literaturze tematu podaje się wiele informacji dotyczących wykorzystania do tego kaolinu. Substancja ta, nazywana również gliną porcelanową<sup>36</sup>, jest dodatkiem, który składa się z mineralnego kaolinitu ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ). Mineral ten wykazuje zdolność do wychwytywania związków alkalicznych, dzięki czemu potas jest wiązany z minerałem. W wyniku tego mechanizmu powstają krzemiany potasowo-glinowe, które mają wyższe temperatury topnienia niż czyste krzemiany potasowe. Wskutek tego możliwe jest równoczesne zapobieganie żużlowaniu i ograniczenie emisji aerozoli, czyli  $SO_x$ , HCl i cząstek stałych (PM)<sup>36, 37</sup>. Kaolin może zmniejszyć stężenie chlorku potasu, wskutek czego następuje zmniejszenie procesu aglomeracji. Może on działać na dwa różne sposoby: poprzez reakcję z metalami alkalicznymi oraz wiązanie zasady w łagodniejsze związki lub poprzez rozcieńczenie w taki sposób, aby krytyczne formy alkaliczne występowały w mniejszym stężeniu



Dr hab. inż. Stanisław PARAFINIUK (ORCID: 0000-0002-8566-6527) w roku 1998 ukończył studia na Wydziale Techniki Rolniczej Akademii Rolniczej w Lublinie (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie). Jest kierownikiem Katedry Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi tej samej uczelni. Specjalność – aplikacja agrochemikaliów, systemy jakości.

w popiele lotnym. Zastosowanie dodatków na bazie Al-Si uznano za najbardziej właściwy dodatek eliminujący problemy związane ze spalaniem biomasy. Niemniej jednak brakuje danych dotyczących jego zastosowania w mieszkach z biomasą rumianku lub rajgrasem<sup>38–42</sup>.

Dodatkowo w takiej biomase zielonej problematyczna jest zawartość azotu, który wpływa na zwiększoną emisję  $\text{NO}_x$  przy jej spalaniu<sup>43–48</sup>. Tutaj pomocne staje się zastosowanie substancji chemicznych zmniejszających emisję  $\text{NO}_x$ . Takim związkami może być mocznik<sup>33, 49–51</sup>. Jest to organiczny związek chemiczny stanowiący diamid kwasu węglowego. Występuje w postaci białego lub prawie białego, krystalicznego proszku lub przezroczystych kryształów. Najczęściej stosowanym rozpuszczalnikiem mocznika jest woda, w której substancja ta łatwo się rozpuszcza. Mocznik jest substancją higroskopijną, a jego gęstość wynosi  $1,32 \text{ g/cm}^3$ . Związek ten ogrzewany do temperatury przekraczającej temperaturę topnienia ( $133\text{--}135^\circ\text{C}$ ) rozkłada się na tlenek i ditlenek węgla, tlenki azotu i amoniak. Jego działanie sprzyja redukcji tlenków siarki i tlenków azotu w spalinach oraz działa antykorozyjnie na urządzenia grzewcze. Wprowadzenie odpowiedniego dodatku do procesu peletowania, jak i bezpośredniego spalania paliw powoduje zmniejszenie ilości powstających dioksyn. Inhibitor dioksyn ze względu na swoją aktywność w procesie  $\text{DeNO}_x$  może spowodować zmniejszenie emitowanych tlenków azotu<sup>33</sup>.

Przeprowadzono ocenę możliwości peletowania produktu ubocznego biomasy zielonej, rajgrasu angielskiego i rumianku, z dodatkiem gliny porcelanowej (kaolinu) i roztworu mocznika, weryfikując wpływ tych dodatków na wybrane cechy fizyczne i chemiczne wytworzonych granulek oraz wydajność i energochłonność procesu zagęszczania.

## Część doświadczalna

### Materiały

Do badań wykorzystano surowce pochodzenia roślinnego w postaci biomasy odpadowej po czyszczeniu nasion rajgrasu angielskiego oraz kwiatostanów rumianku, na którą składały się drobne elementy łodyg, nasiona i zanieczyszczenia mineralne. Jako domieszkę mającą na celu przeciwdziałanie spiekaniu się popiołu i redukcję  $\text{NO}_x$  wykorzystano odpowiednio sproszkowaną glinę porcelanową o gęstości względnej  $2,6 \text{ g/cm}^3$  i pH 4,5 oraz 32,5-proc. wodny roztwór mocznika.

### Metodyka badań

W zgromadzonych surowcach przed zagęszczaniem oznaczono gęstość nasypową surowców wg normy<sup>52</sup>. Badania polegały na nasypaniu próbki surowca w stanie luźnym do pojemnika o objętości  $50 \text{ dm}^3$ , a następnie zważeniu pojemnika z surowcem na wadze laboratoryjnej. Z ilorazu masy i objętości obliczano gęstość w stanie nasypowym. Gęstość utrzęsoną surowców określano za pomocą wstrząsarki laboratoryjnej. Badania polegały na wstrząsaniu pojemnika z surowcem przez 5 min, przy amplitudzie

10 mm i częstotliwości 150 Hz. Po ich zakończeniu ważono pojemnik z surowcem i mierzono obniżenie się poziomu surowca w pojemniku. Uwzględniając otrzymaną objętość, obliczano gęstość utrzęsoną. Rozkład granulometryczny wielkości cząstek rozdrobnionych surowców oznaczano zgodnie z normą<sup>53</sup>, za pomocą wstrząsarki laboratoryjnej typu LPzE-4e z zestawem sit o wymiarach otworów: 3,15; 2,8; 2,0; 1,4; 1,0; 0,5 i 0,25 mm. Do analizy sitowej surowców pobierano próbki o masie  $100 \pm 1 \text{ g}$ , a następnie wstrząsano je przez 5 min z częstotliwością 150 Hz i amplitudą 10 mm. Po jego zakończeniu ważono frakcje znajdujące się na poszczególnych sitach. Zawartość wilgoci oznaczono z dokładnością do 0,01%, metodą suszarkowo-wagową wg normy<sup>54</sup>. Części lotne ( $VM$ ) oznaczono wagowo wg normy<sup>55</sup>. Oznaczenie zawartości węgla (C), wodoru (H) i azotu (N) wykonano wg normy<sup>56</sup>, dla 3 powtórzeń z próbki pobranej z rozdrobnionej biomasy. Siarkę (S) oznaczono wg normy<sup>57</sup>, dla 3 powtórzeń z próbki pobranej z rozdrobnionej biomasy. Ciepło spalania ( $HHV$ ) oznaczono za pomocą izoperibolicznego kalorymetru typu Parr 6400, zgodnie z normą<sup>58</sup>. Zawartość popiołu ( $AC$ ) oznaczono, używając pieca laboratoryjnego, zgodnie z normą<sup>59</sup>.

### Metoda produkcji peletu i warunki procesu

Z przygotowanych surowców wyodrębniono w obrębie danego gatunku 4 próbki. Pierwszą stanowił 100-proc. surowiec, oznaczony dla rajgrasu jako 100T, a dla odpadów rumianku 100R. Drugą stanowiły mieszanki zawierające 95% surowca i 5% kaolinu, oznaczone jako odpowiednio 95T5G i 95R5G. Trzecią stanowiły mieszanki składające się z 95% surowca roślinnego i 5% roztworu wodnego mocznika, oznaczone jako 95T5M i 95R5M, a czwartą stanowiły mieszanki 90% surowca i po 5% kaolinu i roztworu mocznika, oznaczone jako 90T5G5M i 90R5G5M. Dla tak przygotowanych surowców oznaczono zawartość wody, a następnie nawilżano je do wilgotności 16 i 20%. Ilość wody potrzebną do uzyskania pożądanej zawartości wilgoci w surowcu obliczono na podstawie wzoru (1):

$$m_w = \frac{w_2 - w_1}{100 - w_1} \cdot m_s \quad (1)$$

w którym  $m_w$  oznacza masę wody do zwilżania, g,  $w_2$  – pożądaną zawartość wody w mieszance, %,  $w_1$  – początkową zawartość wody w mieszance, %, a  $m_s$  – masę zwilżonej mieszanki, g.

Aglomerację surowców i ich mieszanek wykonywano za pomocą granuladora z nieruchomą płaską matrycą i obrotowymi rolkami dociskowymi napędzanymi silnikiem elektrycznym o mocy znamionowej 7,5 kW. W tabeli 1 przedstawiono dane techniczne granuladora. Średnica otworów w matrycy granuladora wynosiła 8 mm, a stosunek długości peletu do średnicy ( $L:D$ ) wynosił 3,125.

Podczas peletowania oceniono wydajność i energochłonność, prowadząc chronometraż procesu z wykorzystaniem stopera oraz miernika parametrów sieci elektrycznej typu Lumel N14 z przekładnikami prądowymi, za pomocą którego rejestrowano zużycie energii elektrycznej. Wyniki

Table 1. Technical and operational data of pelleting machine

Tabela 1. Dane techniczne i eksploatacyjne granulatora

Specyfikacja	Wartość
Moc znamionowa silnika elektrycznego, kW	7,5
Napięcie zasilania silnika elektrycznego, V	400
Prędkość obrotowa wału z rolkami, rad/s	11,6
Średnica otworów matrycy, mm	8
Grubość matrycy, mm	28
Średnica matrycy, mm	230
Liczba rolek zagęszczających, szt.	2
Średnica rolek zagęszczających, mm	100
Szerokość rolek zagęszczających, mm	50

pomiarów zapotrzebowania energii elektrycznej wykonywano w 3 powtórzeniach i przeliczano na jednostkę masy wytworzonych peletów.

Średnicę ( $D$ ) i długość ( $L$ ) otrzymanych biopaliw starych oznaczono przez bezpośredni pomiar suwmiarką, zgodnie z normą<sup>60</sup>), dla 3 powtórzeń losowo wybranych porcji peletów o wadze  $100 \pm 1$  g. Objętość ( $V$ ) aglomeratów obliczono ze wzoru na objętość walca o średnicy podstawy ( $D$ ) i wysokości ( $L$ ). Gęstość objętościową ( $\rho$ ) obliczono na podstawie cech geometrycznych losowo wybranych próbek oraz masy partii biopaliwa wg wzoru (2):

$$\rho = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D^2 \cdot L} \quad (2)$$

w którym  $\rho$  oznacza gęstość peletów,  $\text{kg/m}^3$ ,  $m$  masę porcji peletu,  $\text{kg}$ ,  $D$  średnią średnicę peletu,  $\text{m}$ , a  $L$  średnią długość peletu,  $\text{m}$ .

Gęstość surowców w stanie nasypowym określano zgodnie z normą<sup>61</sup>). Badania polegały na nasypaniu próbki surowca w stanie luźnym do pojemnika o objętości  $50 \text{ dm}^3$ , a następnie zważeniu pojemnika z surowcem na wadze laboratoryjnej.

Trwałość mechaniczną peletów sprawdzano na stanowisku badawczym zgodnie z normą<sup>62</sup>). Prędkość obrotowa pojemników prostopadłościennych wynosiła  $5,22 \text{ rad/s}$ , czas próby  $10 \text{ min}$ , a masa próbki  $500 \pm 1 \text{ g}$ . Po próbie trwałości testowane próbki peletów przesiewano na sicie o średnicy otworów  $3,15 \text{ mm}$ .

Uzyskane wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej, wykorzystując oprogramowanie STATISTICA 13.3. Testem Shapiro i Wilka sprawdzono rozkład normalny, a testem Browna i Forsytha sprawdzono jednorodność wariancji. Następnie przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA dla układów czynnikowych.

W badanej analizie czynnikami grupującymi niezależnymi było 8 rodzajów wytworzonych peletów (100R, 100T, 95R5M, 95T5M, 95R5G, 95T5G, 90R5M5G, 90T5M5G) oraz wilgotność surowca przed zagęszczaniem 16 i 20%. Z kolei czynnikami grupującymi zależnymi były takie parametry, jak: energochłonność, wydajność, trwałość mechaniczna ( $MD$ ), gęstość nasypowa ( $VD$ ), gęstość objętościowa ( $BD$ ), długość

peletów ( $L$ ), zawartość wilgoci w peletach ( $MC$ ), ciepło spalania w stanie suchym ( $HHV$ ) i zawartość popiołu w stanie suchym ( $AC$ ). W celu oznaczenia grup jednorodnych zastosowano test HSD Tukeya. Do weryfikacji hipotez przyjęto poziom istotności  $p < 0,05$ . Między analizowanymi cechami wyznaczono również współczynnik korelacji Pearsona, a także sprawdzono statystycznie istotne ( $p < 0,05$ ) zależności pomiędzy zmiennymi. Zastosowano też analizę skupień. Po standaryzacji zmiennych aglomerację przeprowadzono za pomocą metody Warda, a jako miarę odległości wykorzystano odległości euklidesowe.

## Wyniki badań

Wartości średnie otrzymanych wyników (z 3 powtórzeń) charakteryzujących wykorzystane surowce pod względem wybranych cech fizycznych i chemicznych, jak również rozkładu granulometrycznego wielkości cząstek przedstawiono w tabelach 2 i 3. W grupie cech chemicznych lepszymi właściwościami energetycznymi charakteryzowała się biomasa rumianku ze względu na większą zawartość węgla i wodoru, a tym samym i większe ciepło spalania oraz ze względu na mniejszą zawartość siarki, części lotnych i popiołu. Zawartość azotu w biomase rajgrasu i rumianku była porównywalna (tabela 2).

Podczas badań zaobserwowano przede wszystkim znaczne zróżnicowanie właściwości fizycznych zgromadzonych surowców. Najmniejszą gęstością nasypową charakteryzowała się biomasa rumianku ( $113,4 \pm 5 \text{ kg/m}^3$ ), natomiast o ok. 50% większą wartością tego parametru charakteryzowała się biomasa rajgrasu ( $169,4 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ ). Podobne relacje obserwowano dla gęstości utrzęsionej, przy

Table 2. Physical and chemical properties of raw materials

Tabela 2. Fizyczne i chemiczne właściwości surowców roślinnych

Parametr	Biomasa rajgrasu angielskiego	Biomasa rumianku
Gęstość nasypowa $BD$ , $\text{kg/m}^3$	$169,4 \pm 3$	$113,4 \pm 5$
Gęstość utrzęsiona $SD$ , $\text{kg/m}^3$	$212,2 \pm 4$	$144,6 \pm 5$
Węgiel $C^d$ , %	$36,77 \pm 0,56$	$40,18 \pm 0,40$
Wodór $H^d$ , %	$5,06 \pm 0,07$	$5,40 \pm 0,16$
Azot $N^d$ , %	$2,90 \pm 0,08$	$2,82 \pm 0,15$
Siarka $S^d$ , %	$0,04 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,01$
Części lotne $VM^f$ , %	$71 \pm 3$	$66 \pm 2$
Ciepło spalania $HHV^d$ , $\text{MJ/kg}$	$17,51 \pm 0,08$	$18,19 \pm 0,03$
Zawartość popiołu $AC^d$ , %	$11,12 \pm 0,56$	$10,42 \pm 0,50$

Skróty i oznaczenia: <sup>f</sup> – stan roboczy, <sup>d</sup> – stan suchy,  $\pm$  – odchylenie standardowe

Table 3. Particle size distribution of the raw materials used for pelleting, %

Tabela 3. Rozkład wielkości cząstek surowców zastosowanych do peletowania, %

Rodzaj surowca	Rozmiar oczek sita, mm							
	3,15	2,8	2,0	1,4	1,0	0,5	0,25	0,0
Biomasa rajgrasu angielskiego T	0,30	0,51	4,32	43,56	29,36	11,78	5,43	4,73
Biomasa rumianku R	0,30	0,67	2,95	15,71	11,06	35,50	23,38	10,44

Skróty i oznaczenia: R – biomasa rumianku, T – biomasa rajgrasu

czym średnia wartość tego parametru wynosiła odpowiednio 144,6±5 i 212,2±4 kg/m<sup>3</sup>, a jej wartości były większe od gęstości nasypowej o ok. 25–26% (tabela 2). Rozkłady wielkości cząstek zależały od rodzaju surowca i jego podatności na rozdrabnianie. Dla pozostałości po czyszczeniu rajgrasu ponad 70% biomasy dominowało na sitach 1,4 i 1,0 mm, natomiast biomasa rumianku charakteryzowała się na tych sitach udziałem tylko niespełna 27-proc., a zdecydowana większość, ponad 70%, była zgromadzona na sitach 0,5; 0,25 oraz 0,0 mm (tabela 3). W zakresie ocenianych parametrów wartości te lokowały się wśród najlepszych gatunków biomasy przeznaczanej na cele energetyczne<sup>19–26, 46</sup>).

Analiza statystyczna wytworzonych peletów w obrębie poszczególnych parametrów z uwzględnieniem czynników grupujących rodzaj surowca i zawartość wilgoci w mieszance wskazała w większości przypadków znaczne istotne różnice pomiędzy ich średnimi wartościami. Kompletnie wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 4, właściwości fizyczne wytworzonych peletów z oznaczeniem grup jednorodnych przedstawiono w tabeli 5, a wybrane właściwości chemiczne w tabeli 6.

Średnica wytworzonych peletów wynosiła 8 mm i w zakresie dokładności pomiaru nie wykazywała zmienności. Znaczne zróżnicowanie zaobserwowano wśród pozostałych analizowanych cech fizycznych. Wyniki badań

Table 4. Analysis of variance (ANOVA); *p* values for the studied characteristics

Tabela 4. Analiza wariancji (ANOVA); wartości *p* dla badanych cech

Zmienna	Typ paliwa (A)	Zawartość wody w surowcach (B)	Jednocześnie A i B
Długość <i>L</i> , mm	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Gęstość objętościowa <i>VD</i> , kg/m <sup>3</sup>	< 0,001*	< 0,001*	0,104*
Gęstość nasypowa <i>BD</i> , kg/m <sup>3</sup>	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Trwałość mechaniczna <i>MD</i> , %	< 0,001*	< 0,001*	0,275*
Zawartość wilgoci <i>MC</i> , %	< 0,001*	< 0,001*	0,023*
Ciepło spalania <i>HHV</i> , MJ/kg	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Zawartość popiołu <i>AC</i> , %	< 0,001*	< 0,001*	0,757*
Wydajność, kg/h	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Energochłonność, Wh/kg	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*

\* wartości istotne z *p* < 0,05

długości wytworzonych peletów dla przyjętych rodzajów surowców w ustalonych mieszankach przedstawiono w tabeli 5.

Na długość peletów miały wpływ przede wszystkim rodzaj, wilgotność i gęstość nasypowa surowców. Najkrótsze pelety otrzymano z surowców bez dodatków, a najdłuższe w mieszance biomasy rumianku z gliną porcelanową (kaolinem) i roztworem mocznika, przy czym z reguły zwiększenie wilgotności surowców powodowało nieznaczne wydłużenie peletów (tabela 5).

Zróżnicowanie wymiarów wytworzonych granул wpływało na zmianę gęstości nasypowej i objętościowej. Wyniki badań gęstości objętościowej produkowanych peletów dla przyjętych wariantów, podobnie jak i dla wcześniej analizowanych parametrów wykazały, że najmniejszą gęstością objętościową charakteryzowały się pelety wytworzone

Table 5. Physical properties of the pellets produced

Tabela 5. Właściwości fizyczne wytworzonych biopaliw

Rodzaj peletu	Zawartość wody w surowcach, %	<i>L</i> , mm	<i>VD</i> , kg/m <sup>3</sup>	<i>BD</i> , kg/m <sup>3</sup>	<i>MD</i> , %
100R	16	21,6±0,81 <sup>a</sup>	1104±15,27 <sup>a</sup>	474±3,65 <sup>a</sup>	94,66±0,57 <sup>a</sup>
	20	26,9±1,15 <sup>b</sup>	1022±7,21 <sup>a, b</sup>	473±7,87 <sup>a, b</sup>	95,66±0,57 <sup>a, b</sup>
100T	16	22,03±1,69 <sup>a-c</sup>	1147±8,08 <sup>a, c</sup>	466±2,16 <sup>a-c</sup>	95,00±0,00 <sup>a-c</sup>
	20	26,26±0,30 <sup>a-d</sup>	1117±34,64 <sup>a, c, d</sup>	457±9,37 <sup>c, d</sup>	95,33±0,57 <sup>a-d</sup>
95R5M	16	26,56±1,58 <sup>a-c</sup>	1029±17,43 <sup>a, b, c</sup>	458±3,60 <sup>c-e</sup>	91,66±0,57 <sup>e</sup>
	20	27,33±1,42 <sup>b-f</sup>	1042±5,03 <sup>a, b, d-f</sup>	425±2,61 <sup>f</sup>	93,33±0,57 <sup>a, c, e, f</sup>
95T5M	16	25,23±1,25 <sup>a-g</sup>	1120±13,20 <sup>a, c, d, f, g</sup>	379±4,20 <sup>g</sup>	94,33±0,57 <sup>a-d, f, g</sup>
	20	22,83±1,80 <sup>a-h</sup>	1074±17,2 <sup>a-g</sup>	341±3,00	96,00±0,00 <sup>a-d, g</sup>
95R5G	16	26,56±1,13 <sup>a-i</sup>	875±16,44 <sup>h</sup>	491±5,72	88,00±1,00 <sup>h</sup>
	20	26,00±1,74 <sup>a-j</sup>	845±64,36 <sup>h, i</sup>	437±2,07 <sup>f, h</sup>	88,33±0,57 <sup>h, i</sup>
95T5G	16	21,83±2,69 <sup>a, c-e, g-k</sup>	854±34,04 <sup>h-j</sup>	455±3,17 <sup>c-e, i</sup>	83,33±1,15 <sup>j</sup>
	20	24,06±0,25 <sup>a-l</sup>	860±39,32 <sup>h-k</sup>	413±3,17 <sup>f, j</sup>	83,66±0,57 <sup>j</sup>
90R5G5M	16	28,50±0,60 <sup>b, d-g, i, j, l, m</sup>	764±35,51 <sup>i, l</sup>	446±2,27 <sup>d, e, h, i</sup>	90,33±0,57 <sup>k</sup>
	20	26,26±2,58 <sup>a-n</sup>	763±3,88 <sup>i, l, m</sup>	393±2,07	90,66±0,57 <sup>c, k, l</sup>
90T5G5M	16	24,10±3,10 <sup>a-o</sup>	866±39,58 <sup>h-k, n</sup>	409±4,76 <sup>j</sup>	88,66±0,57 <sup>h, i, k, m</sup>
	20	25,86±1,01 <sup>a-p</sup>	827±21,08 <sup>h-n</sup>	373±3,17 <sup>g</sup>	89,33±0,57 <sup>h, i, k-n</sup>

Skróty i oznaczenia: R – biomasa rumianku, T – biomasa rajgrasu, G – glina porcelanowa (kaolin), M – roztwór mocznika, L – długość, VD – gęstość objętościowa, BD – gęstość nasypowa, MD – trwałość mechaniczna, <sup>a, b, c, ...</sup> – grupa jednorodna, ± – odchylenie standardowe

Table 6. Chemical properties of the pellets produced

Tabela 6. Właściwości chemiczne wytworzonych peletów

Rodzaj peletu	Zawartość wody w surowcach, %	MC, %	HHV, MJ/kg	AC, %
100R	16	9,59±0,06 <sup>a</sup>	18,21±0,08 <sup>a</sup>	10,38±0,49 <sup>a, b</sup>
	20	11,50±0,04 <sup>b</sup>	18,17±0,069 <sup>a, b</sup>	10,46±0,49 <sup>a, b</sup>
100T	16	8,64±0,07	17,49±0,10 <sup>c</sup>	11,01±0,49 <sup>a-c</sup>
	20	10,14±0,01 <sup>c</sup>	17,53±0,05 <sup>c, d</sup>	11,23±0,62 <sup>a-d</sup>
95R5M	16	10,49±0,07 <sup>c, d</sup>	18,03±0,02 <sup>b, e</sup>	10,78±0,11 <sup>a-c</sup>
	20	11,71±0,06 <sup>b, e</sup>	18,02±0,01 <sup>b, e</sup>	11,19±0,02 <sup>a-f</sup>
95T5M	16	9,38±0,003 <sup>a, f</sup>	17,46±0,01 <sup>c, d, f</sup>	11,24±0,34 <sup>a-g</sup>
	20	10,62±0,11 <sup>c, d</sup>	17,36±0,05 <sup>c, f, g</sup>	11,35±0,42 <sup>b-g</sup>
95R5G	16	10,19±0,43 <sup>c, d, g</sup>	17,68±0,09 <sup>d, h</sup>	13,10±0,009 <sup>h</sup>
	20	11,60±0,18 <sup>c, d, g, h</sup>	17,46±0,06 <sup>c, d, f, g, i</sup>	13,73±0,07 <sup>h, i</sup>
95T5G	16	9,76±0,22 <sup>b, e, i</sup>	16,90±0,05 <sup>j</sup>	14,82±0,05 <sup>j</sup>
	20	11,47±0,14 <sup>a, c, f, h</sup>	16,69±0,05 <sup>k</sup>	15,08±0,05 <sup>j, k</sup>
90R5G5M	16	11,09±0,10 <sup>b, e, i</sup>	17,57±0,02 <sup>c, d, f, h, i, l</sup>	13,46±0,03 <sup>h, i, l</sup>
	20	12,67±0,19 <sup>b, g, i, j, k</sup>	17,45±0,06 <sup>c, d, f, g, i, l</sup>	13,56±0,01 <sup>h, i, l, m</sup>
90T5G5M	16	10,85±0,03 <sup>d, g, k</sup>	16,77±0,03 <sup>l, k</sup>	14,16±0,15 <sup>l, j, l-n</sup>
	20	12,27±0,25 <sup>l</sup>	16,52±0,03 <sup>k</sup>	14,52±0,09 <sup>l-k, n, o</sup>

Skróty i oznaczenia: R – biomasa rumianku, T – biomasa rajgrasu, G – glinika porcelanowa (kaolin), M – roztwór mocznika, MC – zawartość wilgoci, VD – części lotne, HHV – ciepło spalania, AC – zawartość popiołu, <sup>a, b, c, ...</sup> – grupa jednorodna, ± – odchylenie standardowe

z dodatkiem kaolinu (763–875 kg/m<sup>3</sup>), natomiast nieco większą gęstością charakteryzowały się pelety bez dodatków i z roztworem mocznika (1022–1120 kg/m<sup>3</sup>). Wzrost zawartości wody w surowcach z 16 do 20% przeważnie powodował nieznaczne obniżenie wartości tego parametru (tabela 5). Jednocześnie dla analizowanych aglomeratów zwiększenie ilości stosowanych dodatków powodowało zmniejszenie wartości tego parametru z ok. 470 do 380 kg/m<sup>3</sup>, przy czym pewne odstępstwo ze znacznym spadkiem do wartości 340 kg/m<sup>3</sup> zaobserwowano dla peletów wytworzonych z biomasy rajgrasu i roztworu mocznika o wilgotności 20% (tabela 5).

Zastosowanie w mieszankach biomasy rajgrasu lub rumianku gliniki porcelanowej wpływało również na zmniejszenie trwałości mechanicznej peletów, które szczególnie widoczne było dla peletów 95R5G i 95T5G. Zaobserwowano, że zwiększenie wilgotności surowców powodowało nieznaczny, do 1%, spadek wartości trwałości mechanicznej (tabela 5). Istotne jest również, że wytworzone pelety z gliniką porcelanową w zakresie tego parametru nie spełniały zapisów normy<sup>63</sup>).

Proces zagęszczania surowców biomasowych, a ściślej wzrastająca podczas tego procesu temperatura wywołana tarciem surowca o ścianki matrycy, sprzyjał odparowaniu wody. Zawartość wilgoci w otrzymanych peletach kształtowała się w przedziale 8–12%, z tendencją do wyższych wartości tego parametru dla aglomeratu wytworzonego przy wilgotności 20%. Dodatek kaolinu i/lub roztworu mocznika powodował spadek ciepła spalania

peletów. Dodatkowo kaolin, jako dodatek mineralny, zwiększał i tak już niemałą zawartość popiołu. Dość wysoka wartość tego parametru w analizowanej biomacie/peletach była związana z tym, że był to surowiec poprodukcyjny, uboczny, więc zanieczyszczony frakcją mineralną, glebą (tabela 6).

Podczas badań zaobserwowano, że dodatek gliniki porcelanowej powodował spadek energochłonności procesu o ok. 50%, przy czym różnica w wilgotności surowców powodowała zmianę o ok. 20 Wh/kg. Jednocześnie wydajność procesu oscylowała wokół 35 kg/h (tabela 7). Ze względu na wykorzystane surowce, jak i dodatki wartości te są trudno porównywalne z danymi przedstawionymi w literaturze. Jednak wpływ

zawartości wody w surowcach na parametry aglomeratu był podobny w badaniach innych autorów, jak również podczas badań własnych dotyczących zagęszczania innych surowców<sup>64–67</sup>).

Wyniki przeprowadzonej analizy korelacji Pearsona dla poszczególnych cech fizycznych procesu zagęszczania i granulatu przedstawiono w tabeli 8. Dość silnie dodatnie

Table 7. Efficiency and energy consumption of the pellet production process

Tabela 7. Wydajność i energochłonność procesu wytwarzania peletów

Rodzaj peletu	Zawartość wody w surowcach, %	Wydajność, kg/h	Energochłonność, Wh/kg
100R	16	36,71±1,14 <sup>a</sup>	140±8,00 <sup>a</sup>
	20	40,89±1,47 <sup>a, b</sup>	120±8,00 <sup>b</sup>
100T	16	33,25±0,71 <sup>a, c</sup>	178±6,11 <sup>c</sup>
	20	32,29±0,91 <sup>c, d</sup>	178±3,21 <sup>c</sup>
95R5M	16	47,03±0,72	121±4,16 <sup>b, d</sup>
	20	34,69±1,30 <sup>a, c-e</sup>	135±5,86 <sup>a, b, d, e</sup>
95T5M	16	29,71±2,58 <sup>c, d, f</sup>	199±3,60 <sup>f</sup>
	20	23,83±1,56 <sup>g</sup>	196±4,16 <sup>f</sup>
95R5G	16	32,74±2,60 <sup>a, c-f, h</sup>	80±2,08 <sup>g</sup>
	20	32,45±1,72 <sup>a, c-f, h, i</sup>	62±4,03
95T5G	16	27,66±1,02 <sup>f, g</sup>	122±4,93 <sup>b, d, e, h</sup>
	20	32,36±0,47 <sup>c, d-f, h-j</sup>	83±7,57 <sup>g, i</sup>
90R5G5M	16	39,60±1,16 <sup>a, b, k</sup>	97±4,93 <sup>i, j</sup>
	20	33,4±0,80 <sup>a, c-f, h-j, l</sup>	78±3,78 <sup>g, i</sup>
90T5G5M	16	38,27±0,94 <sup>a, b, e, k</sup>	119±3,05 <sup>b, d, h</sup>
	20	33,58±0,96 <sup>a, c-f, h-j, l</sup>	98±4,16 <sup>i, j</sup>

Skróty i oznaczenia: R – biomasa rumianku, T – biomasa rajgrasu, G – glinika porcelanowa (kaolin), M – roztwór mocznika, <sup>a, b, c, ...</sup> – grupa jednorodna, ± – odchylenie standardowe

Table 8. Pearson correlation coefficients for the studied characteristics

Tabela 8. Współczynniki korelacji Pearsona dla badanych cech

Zmienna	Energochłonność, Wh/kg	Wydajność, kg/h	MD, %	BD, kg/m <sup>3</sup>	VD, kg/m <sup>3</sup>	L, mm
Zawartość wody w surowcach 16%						
Energochłonność, Wh/kg	1,000	-0,324	0,624*	-0,531*	0,800*	-0,380
Wydajność kg/h	-0,324	1,000	0,226	0,113	-0,062	0,405*
MD, %	0,624*	0,226	1,000	-0,145	0,780*	-0,062
BD, kg/m <sup>3</sup>	-0,530*	0,113	-0,145	1,000	-0,099	-0,100
VD, kg/m <sup>3</sup>	0,800*	-0,062	0,781*	-0,099	1,000	-0,384
L, mm	-0,380	0,405*	-0,062	-0,100	-0,384	1,000
Zawartość wody w surowcach 20%						
Energochłonność, Wh/kg	1,000	-0,434*	0,768*	-0,162	0,874*	-0,209
Wydajność kg/h	-0,434*	1,000	-0,004	0,734*	-0,140	0,559*
MD, %	0,768*	-0,004	1,000	0,106	0,736*	0,132
BD, kg/m <sup>3</sup>	-0,162	0,734*	0,106	1,000	0,244	0,521*
VD, kg/m <sup>3</sup>	0,874*	-0,140	0,736*	0,244	1,000	0,017
L, mm	-0,209	0,558*	0,132	0,521*	0,018	1,000

Skróty i oznaczenia: L – długość, VD – gęstość objętościowa, BD – gęstość nasypowa, MD – trwałość mechaniczna, \* oznaczone współczynniki korelacji są istotne z  $p < 0,05$

zależności przy obu przyjętych wilgotnościach surowców wystąpiły pomiędzy energochłonnością a gęstością objętościową i trwałością mechaniczną (tabela 8).

Analiza skupień dla 8 badanych rodzajów peletów, przedstawiona na rysunku, przy wilgotności surowca 16% wykazała 2 skupienia przy odległości wiązań ponad 5, natomiast dla peletów wytworzonych przy wilgotności surowca 20% odległość ta wzrosła do ponad 6. Jednocześnie można wyróżnić po 4 grupy w przyjętych wariantach przy odległości wiązań na poziomie 3,6 i 3,2. Są to dla 16% odpowiednio: 90T5G5M i 95T5G; 90R5G5M, 95R5G i 95R5M; 95T5M; 100T i 100R. Natomiast przy 20-proc. zawartości wody w surowcach wyodrębnione grupy różniły się tym, że pelety 95R5M dołączyły do grupy 100R i 100T (rysunek).

## Podsumowanie i wnioski

Wykorzystane surowce uboczne rajgrasu angielskiego i rumianku w analizowanych mieszankach z kaolinem i/ lub roztworem mocznika umożliwiają wytworzenie peletów o pożądanych cechach jakościowych.

Zwiększenie wilgotności surowców z 16 do 20% w większości analizowanych cech powodowało pogorszenie właściwości granul, które nie jest akceptowalne przy uwzględnieniu obserwowanego zmniejszenia energochłonności procesu.

Dodatek do analizowanych surowców glinki porcelanowej powodował zmniejszenie gęstości aglomeratu, jego trwałości mechanicznej, wzrost zawartości popiołu,

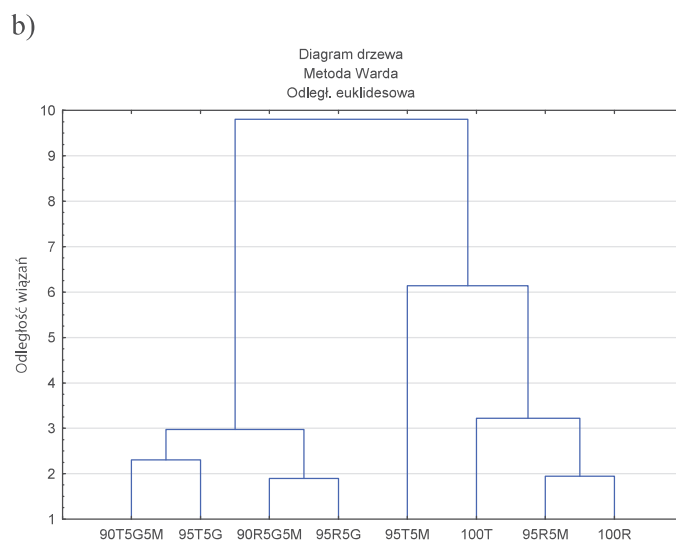
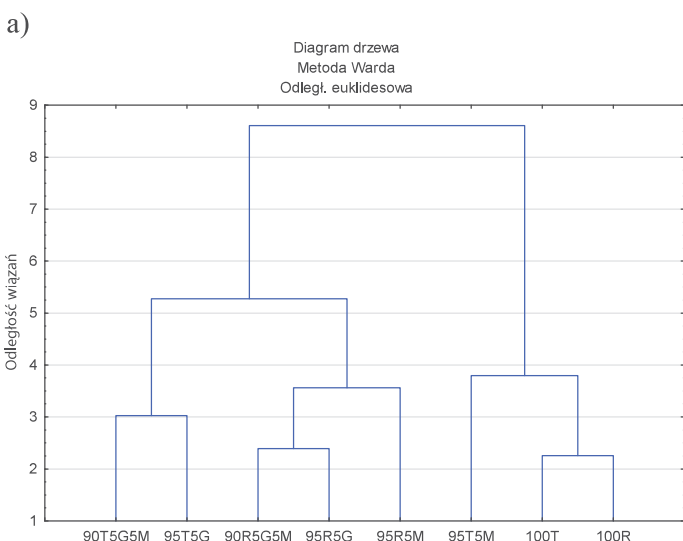


Figure. Dendrogram of hierarchical cluster analysis showing similarities between the branches of the examined pellet types at raw material moisture content of a) 16% and b) 20%

Rysunek. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień pokazujący podobieństwa między gałęziami badanych rodzajów peletów przy wilgotności surowców a) 16% i b) 20%

ale również zmniejszenie o ok. 50% energochłonności procesu.

Rekomenduje się weryfikację analizowanych cech wytworzonych biopaliw stałych poprzez uwzględnienie wpływu stosowanych dodatków w procesie ich spalania w urządzeniach grzewczych małej mocy.

Otrzymano: 28-08-2024

Zrecenzowano: 30-08-2024

Zaakceptowano: 05-09-2024

Opublikowano: 21-10-2024

#### LITERATURA

- [1] S. Proskurina, J. Heinimö, F. Schipfer, E. Vakkilainen, *Renew. Energy* 2017, **111**, 265.
- [2] P. Lamers, R. Hoefnagels, M. Junginger, C. Hamelinck, A. Faaij, *GCB Bioenergy* 2015, **7**, nr 4, 618.
- [3] <https://edepot.wur.nl/192415>, dostęp 22.07.2024 r.
- [4] M. Smaga, G. Wielgosiński, A. Kocharński, K. Korczak, *Acta Innov.* 2018, **26**, 81.
- [5] [https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski\\_09222014\\_columbia.pdf](https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_09222014_columbia.pdf).
- [6] S. Mohapatra, C. Mishra, S.S. Behera, H. Thatoi, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, **78**, 1007.
- [7] G. Maj, A. Najda, K. Klimek, S. Balant, *Energies* 2019, **13**, nr 55, 1.
- [8] A.M. Omer, *Agric. Sci.* 2012, **3**, nr 1, 124.
- [9] A. Komorowska, T. Mirowski, *Int. J. Manage. Econ.* 2018, **54**, nr 3, 210.
- [10] T. Najser, B. Gaze, B. Knutel, A. Verner, J. Najser, M. Mikeska, J. Chojnacki, O. Němček, *Materials* 2022, **15**, nr 3526, 1.
- [11] A. Slavov, N. Yantcheva, I. Vasileva, *Waste Biomass Valor.* 2019, **10**, 2583.
- [12] A.E. Mihaoui, J.C.G. Esteves da Silva, S. Charfi, M.E.C. Castillo, A. Lamart, M.B. Arnao, *Life* 2022, **12**, nr 479, 1.
- [13] Y.L. Dai, Y. Li, Q. Wang, F.J. Niu, K.W. Li, Y.Y. Wang, J. Wang, Ch.Z. Zhou, L. Gao, *Molecules* 2023, **28**, nr 133, 1.
- [14] A. Sah, P.P. Naseef, M.S. Kurunyan, G.K. Jain, F. Zakir, G. Aggarwa, *Pharmaceuticals* 2022, **15**, nr 128, 1.
- [15] R. Chauhan, S. Singh, V. Kumar, A. Kumar, A. Kumari, S. Rathore, R. Kumar, S. Singh, *Plants* 2022, **11**, nr 29, 1.
- [16] A. Langsdorf, M. Volkmar, D. Holtmann, R. Ulber, *Bioresour. Bioprocess.* 2021, **8**, nr 19, 1.
- [17] <https://www.sodr.pl/main/aktualnosci/Cenne-zycice-/idn:312>, dostęp 25.07.2024 r.
- [18] A. Jasinskas, G. Šiaudinis, D. Karčauskienė, R. Marks-Bielska, M. Marks, R. Mieldažys, K. Romaneckas, E. Šarauskis, *Plants* 2024, **13**, nr 1158, 1.
- [19] L. Liu, M.Z. Memon, Y. Xie, Y. Gao, Y. Guo, J. Dong, Y. Gao, A. Li, G. Ji, *Circular Economy* 2023, **2**, 100063, 1.
- [20] P. Kumar, F. Ahmed, R.K. Singh, P. Sinha, *Environ. Dev. Sustain.* 2017, **20**, nr 5, 2119.
- [21] N. Buclet, D. Lazarevic, *Environ. Dev. Sustain.* 2015, **17**, nr 1, 83.
- [22] V. Kocsis, B. Hof, *Environ. Dev. Sustain.* 2016, **18**, nr 5, 1433.
- [23] A. Franco, P. Salza, *Environ. Dev. Sustain.* 2011, **13**, nr 2, 309.
- [24] M. Kiehadroudzehad, A. Merabet, Ch. Ghenai, A.G. Abo-Khalil, T. Salameh, *Heliyon* 2023, **9**, 3407, 1.
- [25] M. Pronobis, S. Kalisz, J. Majcher, J. Wasylów, J. Soltys, *INSTAL* 2020, **3**, 17.
- [26] A.V. De Laporte, A. Weersink, D. McKenney, *Appl. Energy* 2016, **183**, 1053.
- [27] H. Cui, J. Yang, Z. Wang, X. Shi, *Carbon Capture Sci. Technol.* 2021, **1**, 1.
- [28] D. Consiglio, *Phys. Sci. Rev.* 2017, **2**, nr 5, 1.
- [29] J. Shojaeiarani, D.S. Bajwa, S.G. Bajwa, *BioResources* 2019, **14**, nr 2, 4996.
- [30] R. Akdeniz, S. Shishvan, *Agric. Eng.* 2015, **2**, nr 154, 25.
- [31] G. Maj, A. Kuranc, *Wybrane problemy z zakresu ekoenergii i środowiska*, Libropolis, Lublin 2014.
- [32] R. Hejft, S. Obidziński, *Czysta Energia* 2006, **6**, nr 55, 23.
- [33] W. Tic, *Chemik* 2014, **68**, nr 10, 850.
- [34] K. Shirbavikar, A. Harad, A. Sasane, A. Gham, P. Alekar, S. Ajgaonkar, S. Aphale, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2023, **11**, nr 11, 1656.
- [35] T. Zeng, A. Mlonka-Mędrała, V. Lenz, M. Nelles, *Biomass Conv. Bioref.* 2019, **11**, 1211.
- [36] P. Sommersacher, T. Brunner, I. Obernberger, N. Kienzl, W. Kanzian, *Energy Fuels* 2013, **27**, 5192.
- [37] M. Mladenović, M. Paprika, A. Marinković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **82**, 3350.
- [38] L. Wang, Ø. Skreiberg, M. Becidan, H. Li, *Energy Procedia* 2014, **61**, 2008.
- [39] K.O. Davidsson, L.E. Åmand, B.M. Steenari, A.L. Elled, D. Eskilsson, B. Leckner, *Chem. Eng. Sci.* 2008, **63**, nr 21, 5314.
- [40] P.A. Jensen, F.J. Frandsen, H. Wu, P. Glaborg, Mat. Konf. "Impacts of Fuel Quality on Power Production", the 26<sup>th</sup> International Conference, September 19–23, 2016, Prague, Czech Republic.
- [41] R.A. Khalil, D. Todorovic, O. Skreiberg, M. Becidan, R. Backman, F. Goile, A. Skreiberg, L. Sorum, *Waste Manag. Res.* 2012, **30**, nr 7, 643.
- [42] Y. Zhu, Y. Niu, H. Tan, X. Wang, *Front. Energy Res.* 2014, **2**, nr 7, 1.
- [43] M. Maguyon-Detras, M. Migo, N. Van Hung, M. Gummert, *Sustain. Rice Straw Manag.* 2020, **4**, 43.
- [44] J. Malaták, L. Passian, *Res. Agric. Eng.* 2011, **2**, nr 57, 37.
- [45] L. Deng, D. Torres-Rojas, M. Burford, T. Whitlow, J. Lehmann, E. Fisher, *Fuel sensitivity of biomass cook stove performance*, Elsevier, 2018.
- [46] L. Obernberger, T. Brunner, G. Barnthaler, *Biomass Bioenerg.* 2006, **30**, nr 11, 973.
- [47] X. Li, X. Wang, H. Wang, F. He, *ACS Omega* 2023, **8**, 43433.
- [48] S. Rancane, A. Karklins, D. Lazdina, P. Berzins, Mat. Międzynarodowej Konf. „Engineering for Journal Development”, Jelgava, 20–22.05.2015 r., 546.
- [49] J. Lasek, *Heat Mass Transfer* 2014, **50**, 933.
- [50] [https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/local\\_153728.pdf](https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/local_153728.pdf), dostęp 24.07.2024 r.
- [51] J. Kuroпка, *Environ. Prot. Eng.* 2010, **36**, nr 2, 111.
- [52] PN-EN ISO 17828:2016-02, *Biopaliwa stałe. Określanie gęstości nasypowej*.
- [53] PN-EN ISO 17827-2:2016-07, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych. Cz. 2. Metoda przesiewania wibracyjnego przy użyciu sit o wymiarach oczka 3,15 mm lub poniżej*.
- [54] PN-EN ISO 18134-3:2015-11, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci. Metoda suszarkowa. Cz. 3. Wilgoć w próbce do analizy ogólnej*.
- [55] PN-G-04516: 1998, *Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych metodą wagową*.
- [56] CEN/TS 15104:2006, *The Standard for Solid biofuels. Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen*.
- [57] PN-G-04584:2001, *Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości siarki całkowitej i popiołowej automatycznymi analizatorami*.
- [58] PN-EN ISO 18125:2017-07, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie wartości opałowej*.
- [59] PN-EN ISO 18122:2016, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu*.
- [60] PN-EN ISO 16127:2012, *Biopaliwa stałe. Określanie długości i średnicy peletów*.
- [61] PN-EN ISO 17828:2016-02, *Biopaliwa stałe. Określanie gęstości nasypowej*.
- [62] PN-EN ISO 17831-1:2016-02, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej peletów i brykietów. Cz. 1. Pelety*.
- [63] PN-EN ISO 17225-6:2014-08, *Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Cz. 6. Klasy peletów nieдрzewnych*.
- [64] T. Ivanova, B. Havrland, R. Novotny, A. Muntean, P. Hutla, Mat. Międzynarodowej Konf. "Contemporary Research Trends in Agricultural Engineering", Kraków, 25–27 września 2017 r.
- [65] T. Ivanova, M. Kolarikova, B. Havrland, L. Passian, Mat. Międzynarodowej Konf. „Engineering for Journal Development”, Jelgava, 29–30.05.2014 r.
- [66] K. Zawiślak, P. Sobczak, A. Kraszkiewicz, I. Niedziółka, S. Parafiniuk, I. Kuna-Broniowska, W. Tanaś, W. Żukiewicz-Sobczak, S. Obidziński, *Renew. Energy* 2020, **145**, 997.
- [67] S. Obidziński, R. Hejft, *Inż. Aparat. Chem.* 2013, **52**, nr 3, 210.