

## Assessment of the impact of different biomass blending ratios on energy efficiency

# Ocena wpływu różnych proporcji mieszania biomasy na efektywność energetyczną



DOI: 10.15199/62.2026.4.8

Mixts. of sawdust, straw, tobacco, and sewage sludge in various mass proportions, were analyzed for the heat of combustion and calorific value (calorimetric anal.), moisture content, volatile matter, solid matter, and ash (TGA), as well as elemental compn. Lignocellulosic biomass (especially sawdust) significantly improved the calorific value and fuel quality, while sewage sludge reduced energy efficiency due to its high ash content. Blends with a dominant share of sawdust (75%) with the addn. of straw or tobacco proved to be the most beneficial. The results confirm the potential for optimizing waste biomass mixts. for energy purposes.

**Keywords:** waste biomass, calorimetry, thermogravimetry, elemental analysis

Dla mieszanek trocin, słomy, tytoniu i osadów ściekowych w różnych proporcjach masowych oznaczono ciepło spalania i wartość opałową (analiza kalorymetryczna), zawartość wilgoci, części lotnych, części stałych oraz popiołu (TGA), a także skład pierwiastkowy za pomocą analizatora elementarnego. Biomasa lignocelulozowa (szczególnie trociny) istotnie poprawiała wartość opałową i jakość produktu jako paliwa, natomiast osad ściekowy obniżał efektywność energetyczną ze względu na wysoką zawartość popiołu. Najkorzystniejsze okazały się mieszanki z dominującym udziałem trocin (75%) z dodatkiem słomy lub tytoniu. Wyniki potwierdzają możliwość optymalizacji mieszanek biomasy odpadowej do celów energetycznych.

**Słowa kluczowe:** biomasa odpadowa, kalorymeria, termogravimetria, analiza elementarna

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na energię oraz konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, zagospodarowanie biomasy odpadowej jako surowca energetycznego staje się jednym z kluczowych kierunków badań w obszarze odnawialnych źródeł energii. Biomasa odpadowa obejmująca odpady rolne (w tym słomę oraz tytoń), odpady z przemysłu drzewnego (stolarni), spożywczego oraz osady z oczyszczalni ścieków oferuje istotny potencjał zarówno ze względu na swoją dostępność, jak i na możliwość skojarzonego wykorzystania w systemach gospodarki obiegu zamkniętego<sup>1)</sup>. W literaturze podkreśla się, że właściwy dobór produktów (strumieni materiałowych)

oraz optymalizacja warunków konwersji są kluczowe dla efektywnego uzyskania energii z tych surowców.

Technologie bazujące na procesach termochemicznych (takich jak piroliza i zgazowanie) oraz biochemicznych (np. fermentacja metanowa, fermentacja beztlenowa, fermentacja alkoholowa i techniki fotobiologiczne) są obecnie intensywnie rozwijane w kontekście *waste-to-energy* (odpady → energia), a skuteczność odzysku energii w znacznej mierze zależy od składu surowca, warunków procesu oraz typu konwersji<sup>2, 3)</sup>.

Nie mniej istotne jest zrozumienie, jak właściwości fizykochemicznych biomasy odpadowej wpływają na jej



Dr Małgorzata KANIA (ORCID: 0000-0003-1507-9025) w roku 2006 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. W 2022 r. uzyskała stopień doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych na Uniwersytecie Wrocławskim. Jest adiunktem w Zakładzie Geologii i Geochemii Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Specjalność – metody chromatograficzne i pirolityczne.



Mgr Agnieszka WCIŚLAK-OLESZYCKA (ORCID: 0009-0003-9657-6150) w roku 2019 ukończyła studia na Wydziale Geografii i Geologii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Jest specjalistą inżynierjno-technicznym w Zakładzie Geologii i Geochemii Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Specjalność – metody chromatograficzne, termogravimetryczne, analiza elementarna.

**\* Adres do korespondencji:**

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków, tel.: (12) 617-76-97, fax: (12) 430-38-85, e-mail: kaniem@inig.pl

przydatność energetyczną. Autorzy licznych artykułów<sup>4-6)</sup> zwracają uwagę na takie parametry, jak wilgotność, zawartość popiołu i związków mineralnych, skład chemiczny (celuloza/hemiceluloza/lignina), wartość opałowa oraz skład pierwiastkowy, jako kluczowe czynniki wpływające na efektywność energetyczną termicznej konwersji biomasy odpadowej.

Praca ma na celu wskazanie optymalnych proporcji mieszanin różnych typów biomasy, które pozwolą na efektywne wykorzystanie odpadów jako wydajnego paliwa lub surowca energetycznego.

## Część doświadczalna

### Materiały

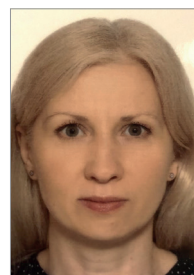
Materiał badawczy stanowiły odpady z różnych źródeł, takich jak: (i) przemysł drzewny (trociny sosnowe), (ii) produkcja rolna (słoma pszenżyta, łodygi tytoniowe) i (iii) osady ściekowe (odwodnione osady z oczyszczalni ścieków).

Dobór tych surowców podyktowany został ich powszechną dostępnością, dużą zmiennością składu chemicznego oraz zróżnicowaną wartością opałową, co umożliwiło uzyskanie szerokiego spektrum kombinacji badawczych. Dla każdego z 4 surowców biomasy odpadowej zostały wykonane mieszanki dwuskładnikowe o stosunkach 25/75, 50/50 i 75/25% mas., dzięki czemu wykorzystano w sumie 22 próbki do celów interpretacyjnych.

### Metodyka badań

Wszystkie próbki badano w stanie powietrzno-suchym. W celu ujednorodnienia próbki do badań zmielono w młynku kulowym, uzyskując frakcję o wielkości ziaren  $< 0,2$  mm. Poszczególne analizy badawcze zostały wykonane w Laboratorium Geochemii Nafty i Gazu.

Oznaczenie składu pierwiastkowego: węgla, wodoru, azotu, siarki i tlenu w próbce wykonano za pomocą analizatora elementarnego FlashSmart 2000 (Thermo Scientific). Próbki o masie 1–2 mg spalano katalitycznie w atmosferze tlenu w temp.  $950^{\circ}\text{C}$ , a powstałe gazy ( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ) po redukcji i oczyszczeniu rozdzielano chromatograficznie. Detekcję prowadzono za pomocą detektora cieplno-przewodnościowego (TCD). Zawartość pierwiastków obliczano metodą kalibracji bezwzględnej względem wzorca BBOT z wykorzystaniem oprogramowania Eager Smart<sup>7)</sup>.



Mgr Yuliia AMASHUKELI (ORCID: 0009-0006-0655-3732) w roku 2003 ukończyła studia na Wydziale Geologii, Mineralogii i Petrografii Uniwersytetu Tarasa Szewczenki w Kijowie. Jest starszym specjalistą inżyniersko-technicznym w Zakładzie Geologii i Geochemii Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Specjalność – analiza kalorymetryczna, analiza elementarna.

Ciepło spalania oznaczono za pomocą kalorymetru bombowego IKA C 200. Próbki biomasy (ok. 0,5 g) uprzednio wysuszone do stanu powietrzno-suchego spalano w atmosferze tlenu pod ciśnieniem ok. 30 bar, a wydzieloną energię wyznaczano na podstawie przyrostu temperatury wody otaczającej bombę kalorymetryczną. Uzyskane wyniki korygowano o zawartość azotu i siarki, oznaczoną wcześniej analizą elementarną, z wykorzystaniem oprogramowania C 5040 CalWin.

Analizę termogravimetryczną (TGA) przeprowadzono w celu określenia zmian masy próbki podczas kontrolowanego ogrzewania w atmosferze obojętnej (azot) oraz utleniającej (powietrze). Pomiary wykonano za pomocą aparatu Mettler Toledo TGA2 sprzężonego z kriostatem Huber Minichiller 300, stosując próbki o masie ok. 7 mg umieszczone w tygielkach wykonanych z tlenku glinu.

Metodyka obejmowała program temperaturowy złożony z segmentów dynamicznych i izotermicznych, umożliwiający analizę proximate paliw stałych. Na podstawie uzyskanych krzywych TG wyznaczono zawartość wilgoci, części lotnych, części stałej (*fixed carbon*) oraz popiołu<sup>8-10)</sup>.

## Wyniki badań i ich omówienie

### Analiza kalorymetryczna

Wyniki badań kalorymetrycznych przedstawione w tabeli wskazują na zróżnicowane wartości ciepła spalania dla różnych typów biomasy odpadowej oraz ich mieszanin. Największą wartość ciepła spalania odnotowano dla trocin – 18 409 J/g (18,41 MJ/kg). Kolejnym surowcem o wysokiej wartości energetycznej była słoma – 17 524 J/g (17,52 MJ/kg), a następnie tytoń – 16 084 J/g (16,08 MJ/kg). Najmniejszą wartością ciepła spalania charakteryzował się osad ściekowy – 12 569 J/g (12,57 MJ/kg), co wskazuje na jego wyraźnie mniejszy potencjał energetyczny w porównaniu z pozostałymi badanymi materiałami.

W przypadku mieszanin z udziałem trocin obserwowano wzrost ciepła spalania wraz ze zwiększaniem ich udziału w mieszance. Analogiczną zależność stwierdzono dla mieszanin zawierających słomę, natomiast w przypadku mieszanin z osadem ściekowym zwiększanie jego udziału powodowało obniżenie wartości opałowej paliwa. Ciepło spalania mieszanin osadu ściekowego z tytoniem mieściło się w zakresie 13,58–15,32 MJ/kg i rosło wraz ze wzrostem udziału tytoniu. Dodatek tytoniu, mimo że charakteryzuje się on niższymi wartościami ciepła spalania i wartości opałowej niż trociny i słoma, również powodował poprawę parametrów energetycznych dla mieszanin z osadem ściekowym. Najniższą wartość opałową wśród analizowanych mieszanin, wynoszącą 12,33 MJ/kg, uzyskano dla mieszanki tytoniu z osadem ściekowym (25/75%). Należy zauważyć, że nawet 25-proc. udział osadu ściekowego w mieszance istotnie obniżał jej wartość energetyczną w porównaniu z czystą biomasą, czyli w 100% pochodzenia roślinnego.

Table. Results of calorimetric and thermogravimetric analysis of the waste biomass mixtures

Tabela. Wyniki analizy kalorymetrycznej oraz termogravimetrycznej mieszanek biomasy odpadowej

Mieszanka biomasy odpadowej	Ciepło spalania, J/g*	Wartość opałowa, J/g*	Wilgoć, %**	Części lotne, %**	Fixed carbon, %**	Popiół, %**
Trociny (100%)	18409	16914	5,94	75,39	12,99	5,67
Słoma (100%)	17524	16080	6,44	71,33	15,16	7,07
Osad (100%)	12569	11332	6,48	49,99	12,12	31,34
Tytoń (100%)	16084	14688	5,12	67,83	17,09	9,94
Trociny + słoma (25/75%)	17585	16132	6,20	71,72	18,91	3,20
Trociny + słoma (50/50%)	18079	16633	6,45	71,84	18,66	3,04
Trociny + słoma (75/25%)	18353	16874	6,44	72,94	18,20	2,39
Trociny + tytoń (25/75%)	16668	15261	3,87	70,85	17,51	7,76
Trociny + tytoń (50/50%)	17221	15793	5,22	70,81	19,88	4,04
Trociny + tytoń (75/25%)	17626	16167	6,49	73,33	18,00	2,18
Trociny + osad (25/75%)	14094	12712	7,98	56,75	12,32	22,97
Trociny + osad (50/50%)	15509	14051	7,82	62,24	14,04	15,86
Trociny + osad (75/25%)	17041	15553	6,84	69,10	15,72	8,32
Słoma + tytoń (25/75%)	16603	15164	5,32	69,39	19,21	6,18
Słoma + tytoń (50/50%)	16739	15287	5,09	72,68	16,74	5,48
Słoma + tytoń (75/25%)	17127	15661	6,10	70,28	19,32	4,29
Słoma + osad (25/75%)	13840	12490	6,63	54,07	14,05	25,21
Słoma + osad (50/50%)	15036	13624	6,93	60,43	15,27	17,38
Słoma + osad (75/25%)	16288	14820	6,62	66,48	16,39	10,48
Tytoń + osad (25/75%)	13575	12334	5,99	54,71	14,10	25,15
Tytoń + osad (50/50%)	14357	13076	4,31	59,82	15,74	20,15
Tytoń + osad (75/25%)	15317	13988	4,54	64,37	18,20	13,10

\* - oznaczono za pomocą analizy kalorymetrycznej; \*\* - oznaczono za pomocą analizy termogravimetrycznej

Badania kalorymetryczne powinny być wykonywane na wczesnym etapie prac laboratoryjnych przy doborze proporcji mieszanin biomasy, aby umożliwić optymalizację parametrów energetycznych paliwa. Analizy te są zgodne z typowymi wynikami dla biomasy odpadowej<sup>11</sup>. Istnieją również liczne artykuły, które omawiają metodologię prognozowania wartości opałowej na podstawie analiz Proximate, pokazując jak skład chemiczny i analiza wilgotności wpływają na te obliczenia<sup>12, 13</sup>.

### Analiza elementarna

Zawartość węgla w analizowanych próbkach mieszanek biomasy wahała się w przedziale od 31,12% dla próbki zawierającej 100% osadu ściekowego do 50,42% dla próbki składającej się w 100% z trocin (rys. 1). Próbka osadu ściekowego charakteryzowała się zdecydowanie najwyższą zawartością siarki (1,19%). W próbkach pozbawionych dodatku osadu ściekowego nie wykryto siarki, co wskazuje, że jej obecność prawdopodobnie była związana wyłącznie z udziałem tego komponentu.

Analiza wykazała, że osad ściekowy cechował się najwyższą zawartością azotu (5,41%), podczas gdy w trocinach nie stwierdzono jego obecności. Uwzględniając sumarycz-

ną zawartość węgla, azotu, tlenu, siarki i wodoru, można wnioskować, że największą zawartością substancji mineralnych charakteryzował się osad ściekowy, a najmniejszą trociny. Słoma oraz tytoń wykazywały zbliżoną zawartość substancji mineralnych (popiołu), co zostało również potwierdzone wynikami badań termogravimetrycznych (tabela). Substancje te mogły pochodzić z gleby, z której produkty nie zostały wystarczająco oczyszczone.

### Analiza termogravimetryczna

Badane mieszanki biomasy wykazywały wyraźne zróżnicowanie pod względem wyników analizy Proximate (czyli zawartości wilgoci, części lotnych, popiołu oraz *fixed carbon*) (tabela). Próbka składająca się w 100% z trocin charakteryzowała się najwyższą zawartością części lotnych (75,39%) oraz najniższą wśród próbek jednoskładnikowych zawartością popiołu.

Szczególnie odmiennymi właściwościami wyróżniał się osad ściekowy, który cechował się najniższą zawartością części lotnych (49,99%) oraz zdecydowanie najwyższą zawartością popiołu (31,34%). Obserwacje te pozostają spójne z wynikami analizy elementarnej (rys. 2), w której dla osadu ściekowego odnotowano najniższą zawartość

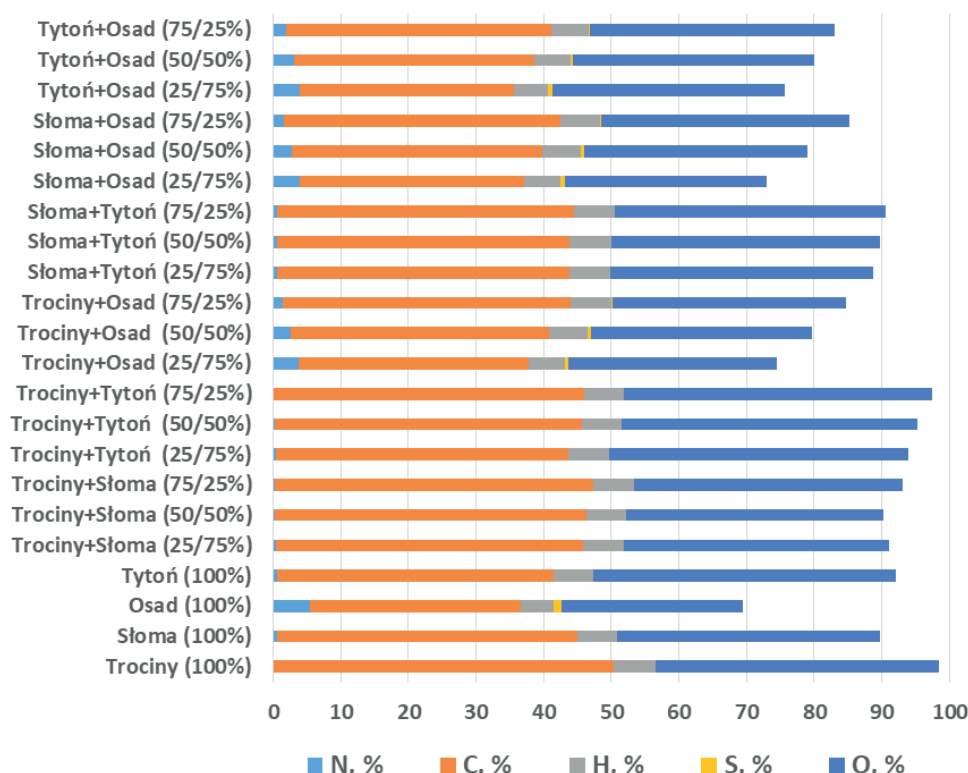


Fig. 1. Summary of the results of elemental analysis of biomass mixtures  
Rys. 1. Zestawienie wyników analizy elementarnej mieszanek biomasy

węgla, natomiast podwyższone udziały pozostałych pierwiastków wskazywały na znaczący udział frakcji mineralnej. Obserwowano także korelację między zawartością popiołu, uzyskaną w wyniku analizy termogravimetrycznej, a zawartością frakcji mineralnej. Udział frakcji nieorganicznej liczonej różnicowo (frakcji mineralnej) został oznaczony na podstawie wyników analizy elementarnej następująco: frakcja mineralna =  $100\% - (\%C + \%H + \%N + \%S + \%O)$ <sup>14)</sup>. W przypadku osadu ściekowego różnice pomiędzy zawartością frakcji mineralnej i popiołu mogły wynikać z obecności soli nieorganicznych, które mogły odparowywać w trakcie analizy termogravimetrycznej, zaniżając korelację<sup>15, 16)</sup>.

Uzyskane wyniki wskazują na silną zależność pomiędzy składem elementarnym, parametrami

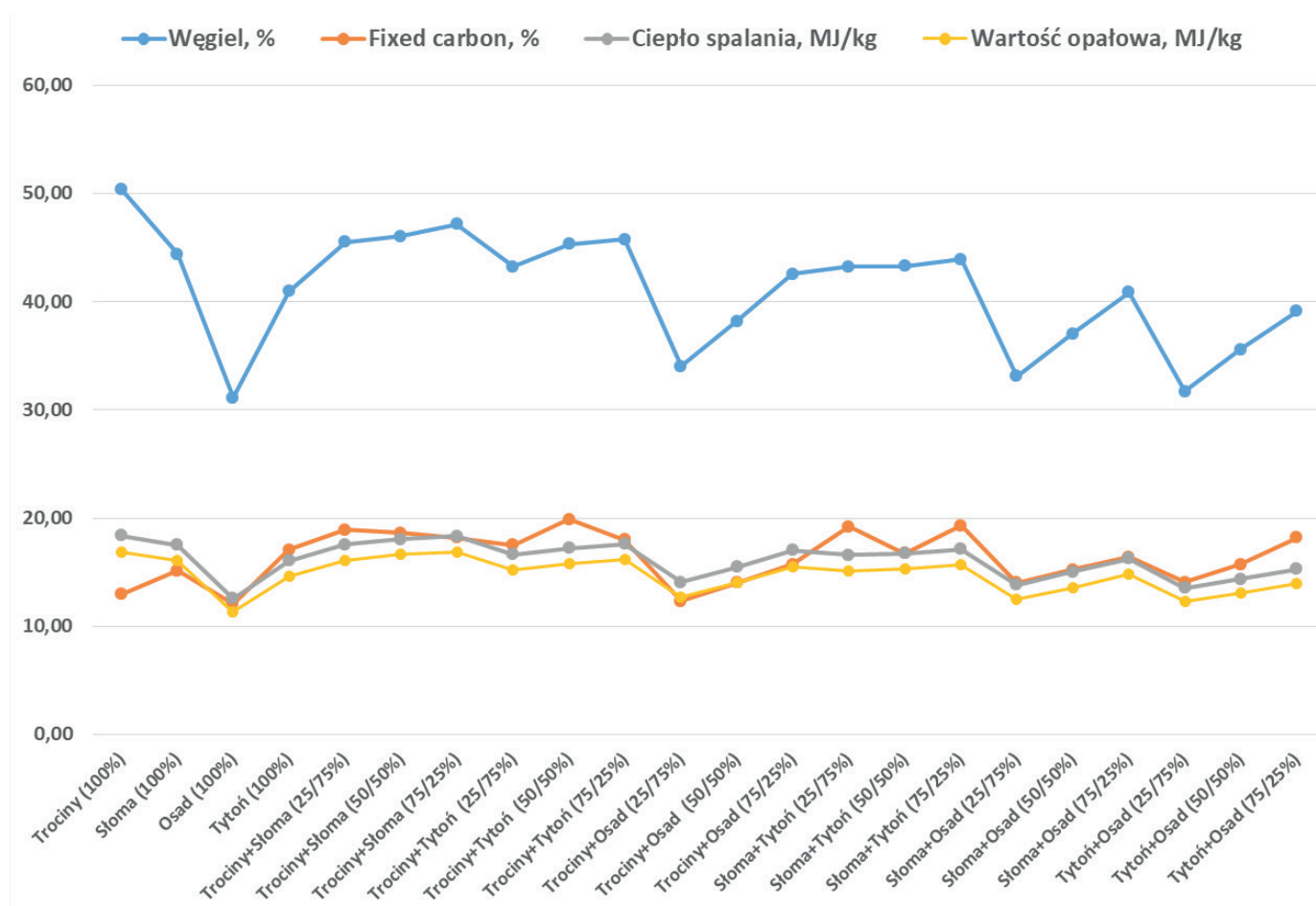


Fig. 2. Comparison of carbon content, fixed carbon, combustion heat and calorific value obtained for individual waste biomass mixtures

Rys. 2. Porównanie zawartości węgla, fixed carbon, ciepła spalania i wartości opałowej dla poszczególnych mieszanek biomasy odpadowej

analizy termogravimetrycznej a właściwościami energetycznymi biomasy. Największe wartości węgla obserwowano dla czystych substratów oraz mieszanek o dominującym udziale trocin i tytoniu, natomiast obecność osadu ściekowego wyraźnie obniżała wartość tego parametru (rys. 2). Udział *fixed carbon* wykazywał stosunkowo niewielką zmienność, utrzymując się w przedziale charakterystycznym dla biomasy lignocelulozowej, co sugeruje stabilność właściwości termicznych niezależnie od proporcji surowców pochodzenia roślinnego. Ciepło spalania wykazywało podobny trend jak zawartość węgla, co wskazywało na silną korelację między składem organicznym a właściwościami energetycznymi.

Dodatek osadu ściekowego, mimo negatywnego wpływu na parametry energetyczne, jest uzasadniony z punktu widzenia gospodarki odpadami i może być kompensowany odpowiednim doбором biomasy roślinnej. Jest to spójne z wiedzą literaturową, potwierdzającą, że dodatek odpadów roślinnych do osadu ściekowego powoduje poprawę jakości powstałej mieszanki, zmniejsza zawartość metali ciężkich, a przede wszystkim podnosi efekty energetyczne danej mieszaniny<sup>17-19</sup>).

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają istnienie wyraźnej korelacji pomiędzy zawartością węgla, udziałem części lotnych oraz wartością opałową badanych próbek. Spójność rezultatów analizy elementarnej i termogravimetrycznej wskazuje na ich komplementarność w ocenie jakości paliwowej biomasy. Wysoka zawartość popiołu i składników nieorganicznych w osadzie ściekowym ogranicza jego zastosowanie jako samodzielnego paliwa, jednak jego wykorzystanie w mieszankach z biomasą roślinną stanowi uzasadnione rozwiązanie z punktu widzenia gospodarki odpadami.

Podsumowując, odpowiednie komponowanie mieszanin biomasy umożliwia optymalizację ich parametrów ener-

tycznych przy jednoczesnym zagospodarowaniu trudnych odpadów, takich jak osady ściekowe. Wskazuje to na duży potencjał praktyczny badanego podejścia, szczególnie w kontekście zrównoważonego gospodarowania zasobami i produkcji paliw alternatywnych.

*Badania wykonano w ramach pracy statutowej pt. „Dobór składu mieszanek różnych typów biomasy odpadowej” – praca INiG-PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 48/SG/25, nr archiwalny DK-4100-26/25.*

Otrzymano: 31-03-2026

Zrecenzowano: 02-04-2026

Zaakceptowano: 07-04-2026

Opublikowano: 27-04-2026

## LITERATURA

- [1] R. Przygodzka, A. Badora, K. Krukowski, K. Kud, J. Mioduszewski, M. Woźniak, *Odnawialne źródła energii w rolnictwie Polski Wschodniej – uwarunkowania rozwoju*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Białystok 2023.
- [2] S.Y. Lee, R. Sankaran, K.W. Chew, C.H. Tan, R. Krishnamoorthy, D.-T. Chu, P.-L. Show, *BMC Energy* 2019, **1**, 4.
- [3] B.Y. Konyannik, J.D. Lavie, *Bioresour. Technol.* 2025, **435**, 132973.
- [4] S. Deng, H. Tan, X. Wang, F. Yang, R. Cao, Z. Wang, R. Ruan, *Bioresour. Technol.* 2017, **239**, 302.
- [5] A. Vasileiadou, *Urban Sci.* 2024, **121**, 8.
- [6] D. Zhu, Q. Wang, G. Xie, Z. Ye, Z. Zhu, C. Ye, *Renew. Energy* 2024, **222**, 119881.
- [7] A. Duda, *Nafta-Gaz* 2025, **5**, 318.
- [8] A. Strandberg, P. Holmgren, M. Broström, *Fuel Process. Technol.* 2017, **156**, 107.
- [9] A. Özyuguran, S. Yaman, *Energy Procedia* 2017, **107**, 130.
- [10] I.K.G. Devara, W.A. Lestari, U.M.R. Paturi, J.H. Park, N.G.S. Reddy, *Materials* 2025, **18**, 3264.
- [11] A.D.S. Borges, M. Oliveira, B.M.M. Teixeira, F. Branco, *Environments* 2024, **11**, 14.
- [12] O. Olatunji, S. Akinlabi, M. Mashini, S. Fatoba, O. Ajayi, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018, **423**, 012175.
- [13] A. Wciślak-Oleszycka, M. Kania, *Przem. Chem.* 2025, **104**, nr 4, 476.
- [14] M. Jager, F. Schroter, M. Wark, L. Giani, *Biochar* 2022, **4**, 52.
- [15] A. Ewald, G. Roeder, H. Spliethoff, S. Fendt, *ACS Omega* 2025, **10**, 25733.
- [16] T.K. Hannl, G. Häggström, A. Hedavati, N. Skoglund, M. Kuba, M. Öhman, *Fuel Process. Tech.* 2022, **227**, 107102.
- [17] M.Z. Gusiatin, *Energies* 2024, **17**, 5736.
- [18] A. Greinert, M. Mrówczyńska, W. Szefer, *Sustainability* 2019, **11**, 3083.
- [19] A. Magdziarz, M. Wilk, *J. Therm. Anal. Calorim.* 2013, **114**, 519.

BYDGOSZCZ

**68.** ZJAZD NAUKOWY POLSKIEGO TOWARZYSTWA CHEMICZNEGO

14-18 WRZEŚNIA 2026