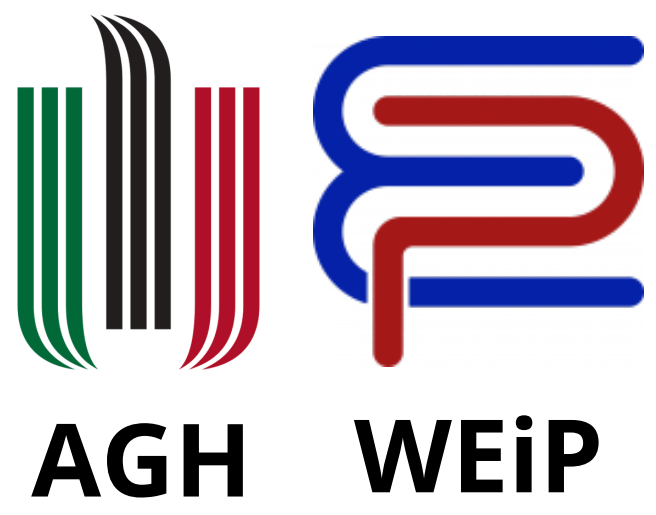


WŁAŚCIWOŚCI BIOKARBONIZATÓW UZYSKANYCH Z KOMUNALNYCH I PRZEMYSŁOWYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH

MGR INŻ. KOLARZ KAROLINA*, DR INŻ. MAKOWSKA DOROTA,
DR INŻ. KAPUSTA KATARZYNA, MGR INŻ. STYPKA ZUZANNA

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie,
Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
*Autor korespondencyjny, adres e-mail: kolarz@agh.edu.pl



Wprowadzenie

Według Eurostatu w 2023 r. we wszystkich oczyszczalniach ścieków w Europie powstało ok. 8,7 mln Mg s.m. osadów¹, w tym 0,95 mln Mg s.m. w Polsce².

Charakteryzują się one dużą zawartością materii organicznej i składników odżywczych, które mają pozytywny wpływ na glebę i roślinność oraz predysponują je do wykorzystywania jako materiał energetyczny³⁻⁶. Niestety w skład osadów wchodzi także substancje niebezpieczne (metale ciężkie, WWA, POP, PCB, PCDD/F i mikroplastik⁶⁻¹⁰), które przy nieodpowiednim zagospodarowaniu stanowią poważne zagrożenie dla środowiska^{6,11}. Dochodzi więc do zwiększania regulacji metod ich utylizacji¹², gdyż tradycyjne metody (składowanie i stosowanie w rolnictwie) nie zapobiegają przenikaniu tych zanieczyszczeń do środowiska^{7,13-18}. Natomiast spalanie, choć coraz częściej wykorzystywane¹², bo znacznie redukuje objętość osadów i możliwy jest w tym procesie odzysk energii i surowców^{19,20}, to w jego wyniku może dochodzić do zanieczyszczenia powietrza, a utrzymanie wymaganej temperatury procesu często odbywa się przy użyciu nieodnawialnych paliw pomocniczych^{7,21-23}. Dlatego też odpowiednie zagospodarowanie osadów jest jednym z najważniejszych problemów Gospodarki o Obiegu Zamkniętym²⁴. Rozwiązaniem tego problemu może być piroliza, która efektywnie redukuje ilość osadu, zawartych w nim niebezpiecznych substancji oraz stwarza warunki, w których jej produkty mogą być dalej wykorzystane z odzyskiem energii i surowców^{6, 25-34}.

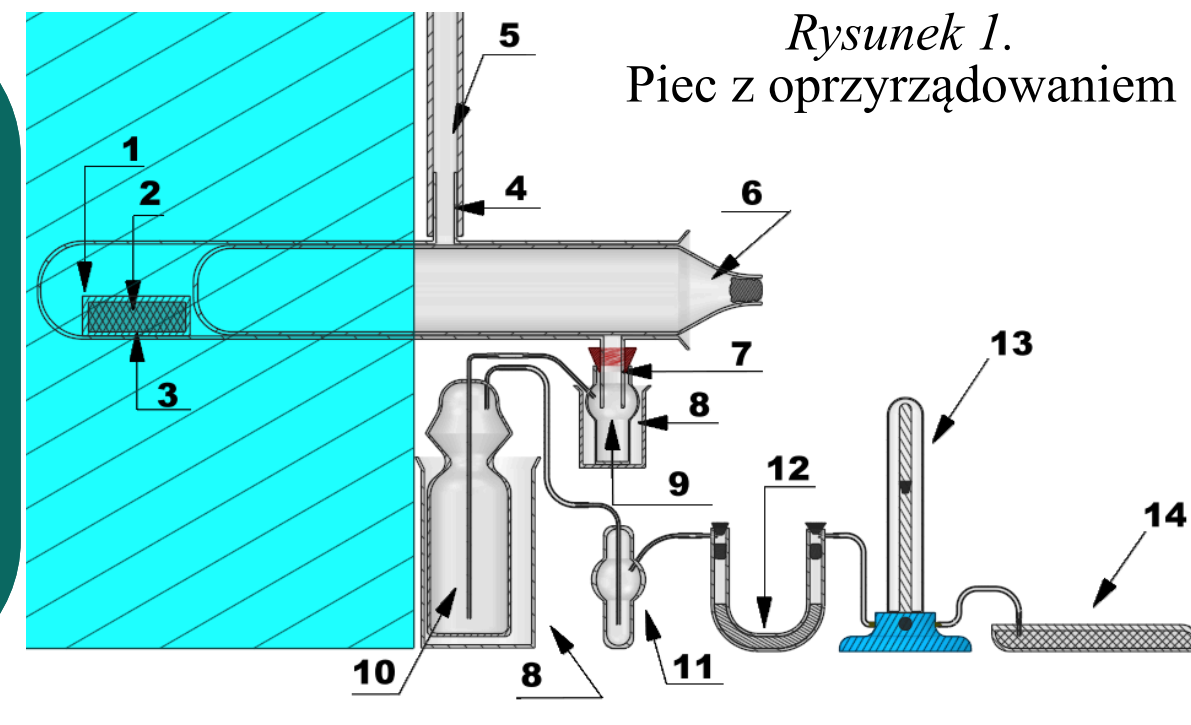
Materiały i metody

Materiał badawczy stanowiły próbki osadów pochodzących z komunalnej i dwóch przemysłowych (przemysł spożywczy i rafinerijny) oczyszczalni ścieków, które były reprezentatywne dla populacji osadów. Ich szczegółowa charakterystyka została przeprowadzona w ramach projektu „Analiza mobilności wybranych pierwiastków toksycznych przemysłowych osadach ściekowych przy wykorzystaniu ekstrakcji sekwencyjnej”³⁵. Osad komunalny pochodził ze zlokalizowanej w dużej aglomeracji miejskiej oczyszczalni ścieków o przepustowości 160 tys. m³/dobę i był odwadniany za pomocą wirówki i neutralizowany. Natomiast próbki osadów z przemysłu spożywczego i rafinerii zostały poddane odwodnieniu w wirówce i na prasach filtracyjnych. Oczyszczalnie te miały przepustowość kolejno 4000 m³/dobę i 200 m³/dobę.

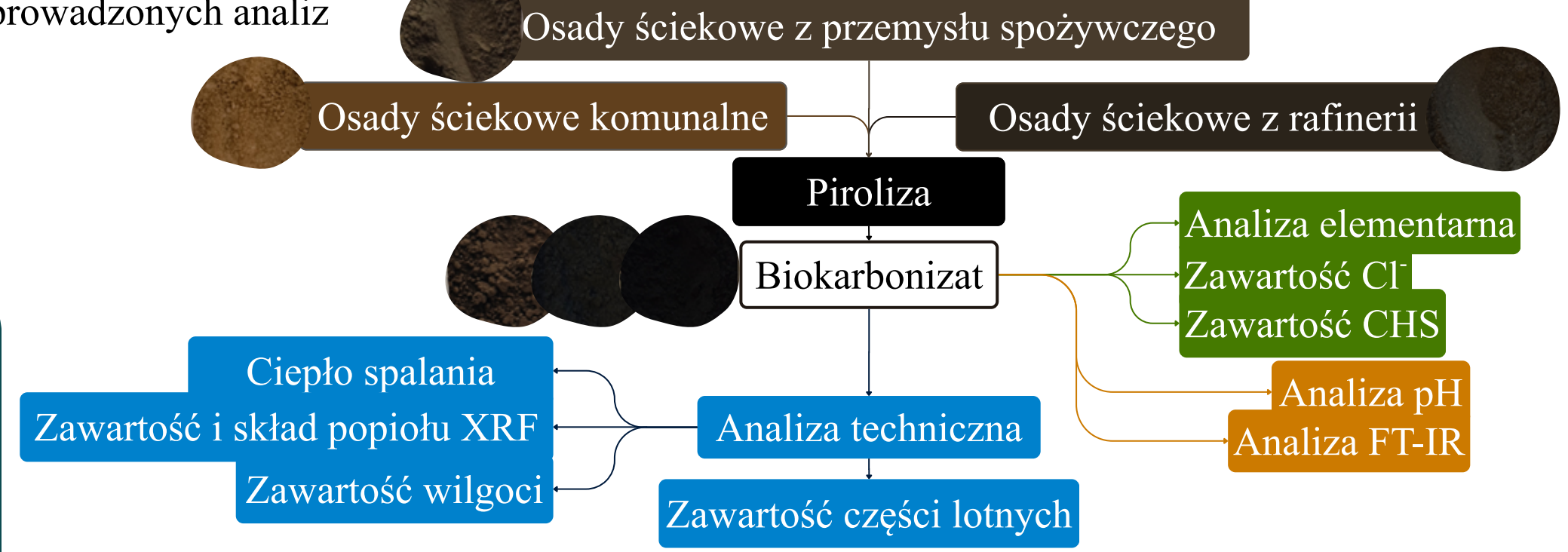
Proces pirolizy osadów ściekowych przeprowadzono w poziomym piecu rurowym w warunkach quasi-izotermicznych, aby lepiej odwzorować warunki panujące w przemysłowej instalacji utylizacji odpadów, który wraz z całym oprzyrządowaniem pokazano na rysunku 1. Pirolizę przeprowadzono w temperaturach 500 i 700°C oraz w czasie 5, 8 i 12 minut. Pirolizę prowadzono w atmosferze argonu, o przepływie 1 dm³/min. Ocenę właściwości powstałych biokarbonizatów wykonano w oparciu o analizę techniczną i elementarną, skład popiołu, odczyn pH oraz analizę FTIR, a schemat przeprowadzonych analiz przedstawiono na rysunku 2.

Cel

Ocena właściwości biokarbonizatów powstałych w wyniku pirolizy różnych typów osadów ściekowych: komunalnych oraz przemysłowych (przemysł spożywczy i petrochemiczny).



Rysunek 2. Schemat przeprowadzonych analiz



	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	51.1	26.4	27.5
5 min 500°C	66.6	39.2	46.3
8 min 500°C	69.9	42.6	52.2
12 min 500°C	72.3	39.1	61.1
5 min 700°C	80.8	54.7	75.8
8 min 700°C	82.1	53.6	75.8

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	84.54	72.12	98.13
5 min 500°C	76.74	67.08	98.13
8 min 500°C	76.90	62.09	96.28
12 min 500°C	94.13	56.62	95.55
5 min 700°C	73.52	51.72	99.75
8 min 700°C	78.33	61.69	99.88

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
5 min 500°C	0.70	0.70	0.55
8 min 500°C	0.67	0.65	0.48
12 min 500°C	0.64	0.60	0.40
5 min 700°C	0.60	0.54	0.33
8 min 700°C	0.59	0.53	0.32

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	25.1	43.1	52.3
5 min 500°C	21.8	45.2	33.0
8 min 500°C	20.3	44.8	31.5
12 min 500°C	17.7	40.4	21.4
5 min 700°C	18.0	41.7	18.0
8 min 700°C	15.7	42.8	17.3

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	3.80	5.85	11.85
5 min 500°C	1.76	3.43	4.53
8 min 500°C	1.40	3.19	4.17
12 min 500°C	1.78	2.49	2.78
5 min 700°C	0.88	1.76	1.22
8 min 700°C	0.94	1.12	1.22

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	1.46	1.41	1.94
5 min 500°C	0.94	1.12	2.52
8 min 500°C	0.89	1.15	2.55
12 min 500°C	0.86	1.24	2.94
5 min 700°C	0.80	1.51	3.07
8 min 700°C	0.82	1.54	2.61

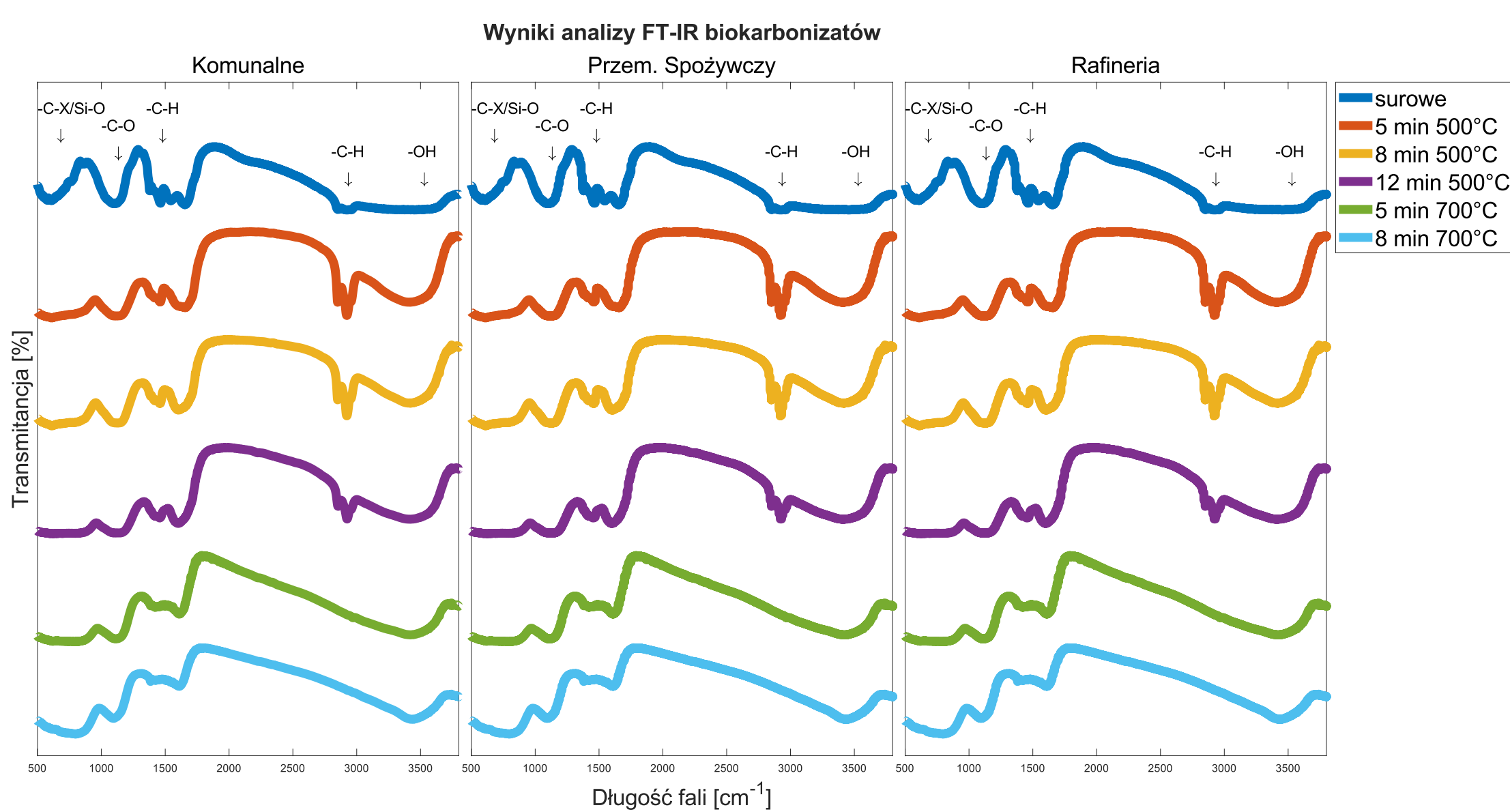
	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	0.10	0.07	0.19
5 min 500°C	0.37	0.26	0.57
8 min 500°C	0.37	0.28	0.53
12 min 500°C	0.45	0.41	0.71
5 min 700°C	0.20	0.11	0.79
8 min 700°C	0.17	0.12	0.95

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	0.14	0.14	0.23
5 min 500°C	0.08	0.08	0.14
8 min 500°C	0.07	0.07	0.13
12 min 500°C	0.10	0.06	0.13
5 min 700°C	0.04	0.04	0.07
8 min 700°C	0.06	0.03	0.07

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
Surowe	11.00	18.90	25.81
5 min 500°C	7.28	17.88	8.47
8 min 500°C	6.23	17.23	8.31
12 min 500°C	7.63	16.27	6.93
5 min 700°C	6.60	14.98	6.05
8 min 700°C	5.90	15.28	9.36

	Komunalne	Przem. Spożywczy	Rafineria
5 min 500°C	7.53	7.85	8.28
8 min 500°C	7.54	8.01	8.29
12 min 500°C	7.82	8.24	8.61
5 min 700°C	9.40	9.27	10.27
8 min 700°C	11.25	9.83	10.89

Wyniki analizy FT-IR biokarbonizatów



	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn
Komunalne	5.97	28.86	8.36	0.90	4.54	15.43	1.73	30.50	1.16
5 min 500°C	5.93	29.16	8.42	0.88	4.60	15.33	1.70	30.21	1.16
8 min 500°C	6.05	28.80	8.57	0.84	4.61	15.48	1.73	30.35	1.19
5 min 700°C	5.95	28.00	8.95	0.92	4.68	16.83	1.70	29.74	1.00
8 min 700°C	5.86	28.68	8.09	0.69	4.54	15.39	1.71	31.04	1.25
Przem. Spożywczy	38.06	3.87	6.54	2.95	2.11	16.79	0.31	26.74	1.29
5 min 500°C	36.75	3.89	6.13	2.83	1.85	15.93	0.33	29.03	1.48
8 min 500°C	37.48	3.81	6.29	3.48	2.04	16.24	0.29	27.01	1.47
5 min 700°C	31.73	4.80	6.17	3.44	1.89	19.71	0.35	29.13	1.31
8 min 700°C	35.46	3.61	5.91	3.57	2.12	17.40	0.30	28.38	1.63
Rafineria	2.46	10.53	7.36	3.16	2.23	34.51	0.63	36.75	0.61
5 min 500°C	2.47	10.68	7.95	3.51	2.21	35.54	0.66	35.01	0.43
8 min 500°C	2.69	10.18	7.19	3.02	2.17	35.06	0.70	36.90	0.45
5 min 700°C	2.26	9.73	6.92	3.83	2.22	35.77	0.63	36.70	0.51
8 min 700°C	2.46	11.11	7.67	3.87	2.58	34.02	0.65	35.77	0.36

	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn
Komunalne	5.97	28.86	8.36	0.90	4.54	15.43	1.73	30.50	1.16
5 min 500°C	5.93	29.16	8.42	0.88	4.60	15.33	1.70	30.21	1.16
8 min 500°C	6.05	28.80	8.57	0.84	4.61	15.48	1.73	30.35	1.19
5 min 700°C	5.95	28.00	8.95	0.92	4.68	16.83	1.70	29.74	1.00
8 min 700°C	5.86	28.68	8.09	0.69	4.54	15.39	1.71	31.04	1.25
Przem. Spożywczy	38.06	3.87	6.54	2.95	2.11	16.79	0.31	26.74	1.29
5 min 500°C	36.75	3.89	6.13	2.83	1.85	15.93	0.33	29.03	1.48
8 min 500°C	37.48	3.81	6.29	3.48	2.04	16.24	0.29	27.01	1.47
5 min 700°C	31.73	4.80	6.17	3.44	1.89	19.71	0.35	29.13	1.31
8 min 700°C	35.46	3.61	5.91	3.57	2.12	17.40	0.30	28.38	1.63
Rafineria	2.46	10.53	7.36	3.16	2.23	34.51	0.63	36.75	0.61
5 min 500°C	2.47	10.68	7.95	3.51	2.21	35.54	0.66	35.01	0.43
8 min 500°C	2.69	10.18	7.19	3.02	2.17	35.06	0.70	36.90	0.45
5 min 700°C	2.26	9.73	6.92	3.83	2.22	35.77	0.63	36.70	0.51
8 min 700°C	2.46	11.11	7.67	3.87	2.58	34.02	0.65	35.77	0.36

Wnioski

Badania wykazały, że kluczowy wpływ na właściwości końcowych produktów pirolizy oraz rodzaj osadu. Karbonizaty uzyskane w temperaturze 700°C po 8 minutach charakteryzowały się najbardziej korzystnymi parametrami użytkowymi. Produkty pochodzące z przemysłowych osadów ściekowych wykazywały dobre właściwości energetyczne. Z kolei biokarbonizaty z osadów komunalnych, ze względu na wyższą zawartość popiołu a co za tym idzie również większą zawartość składników odżywczych, takich jak fosfor, mogą być przydatne w recyklingu surowcowym i poprawie jakości gleb.

Literatura

1. EUROSTAT. „Sewage sludge production and disposal”. Dostęp: 14.11.2025
2. GUS. „Ochrona Środowiska 2024”. Warszawa, 2024.
3. X. Yin i inni. „Improvements in physicochemical and nutrient properties of sewage sludge biochar by the co-pyrolysis with organic additives”. *Science of The Total Environment*, t. 779, 146565, 2021.
4. Z. Chang i inni. „Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review”. *Resource Conservation & Recycling*, t. 154, 104806, 2020.
5. J. Qin i inni. „Sludge char-to-fuel approaches based on the pyrolysis III: Adding protein without dehydrolysis”. *Waste Management*, t. 93, 47-53, 2019.
6. A. Zhou i inni. „Process design and optimization on self-sustaining pyrolysis and carbonization of municipal sewage sludge”. *Waste Management*, t. 159, 125-133, 2023.
7. X. Liu i inni. „Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China”. *Appl Therm Eng*, t. 128, 464-470, 2018.
8. A. Zaker i inni. „Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review”. *Fuel Processing Technology*, t. 187, 64-104, 2019.
9. M. Vujanović i inni. „Recent progress in sustainable energy-efficient technologies and environmental impacts on energy systems”. *Appl Energy*, t. 283, 116280, 2021.
10. E. A. Puzosobon i L. Seifert. „Emerging environmental health risks associated with the land application of bioislands: a scoping review”. *Environmental Health*, t. 22, nr 1, s. 57, 2023.
11. J. Ruzicka i inni. „A comprehensive assessment of potential hazards caused by organic compounds in biochar for agricultural use”. *Hazard Mater*, t. 403, 123644, 2021.
12. Rada Unii Europejskiej. Dyrektywy 91/271/EEC, 1999/31/EC, 186/278/EEC.
13. Y. H. Kuan i inni. „Study of the combustion characteristics of sewage sludge pyrolysis oil, heavy fuel oil, and their blends”. *Energy*, t. 201, 117559, 2020.
14. C. He i inni. „Hydrothermal gasification of sewage sludge and model compounds for renewable hydrogen production: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 39, 1127-1142, 2014.
15. I. Font i inni. „Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 16, nr 5, 2781-2805, 2012.
16. J. Zhu i inni. „Desulfurization using limestone during sludge incineration in a fluidized bed furnace: Increased risk of particulate matter and heavy metal emissions”. *Fuel*, t. 273, 117614, 2020.
17. Z. Huang i inni. „The effects of Fe2O3 catalyst on the conversion of organic matter and bio-fuel production during pyrolysis of sewage sludge”. *Journal of the Energy Institute*, t. 92, 4, 835-842, 2019.
18. Z. Zhang i inni. „Migration characteristics of heavy metals during sludge pyrolysis”. *Waste Management*, t. 120, 52-62, 2021.
19. M. Husák i inni. „P-recovery versus current sewage sludge treatment policy in the Czech Republic and Japan”. *Clean Technol Environ Policy*, t. 26, nr 6, 1883-1899, 2024.
20. V. Singh i inni. „Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India: Waste to waste approach”. *J Clean Prod*, t. 276, 122528, 2020.
21. G. Hai i inni. „Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches”. *J Clean Prod*, t. 251, 119394, 2020.
22. J. Liu i inni. „Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler”. *J Hazard Mater*, t. 167, nr 1-3, 817-823, 2009.
23. Z. Gong i inni. „Study on migration characteristics of heavy metals during oil sludge incineration”. *Per Sci Technol*, t. 36, nr 6, 469-474, 2018.
24. J. Raack i inni. „Biochar - Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review”. *Waste Biomass Valorization*, t. 11, nr 7, 3077-3709, 2020.
25. B. Wang i inni. „Characteristics of the production of hydrogen-rich combustible gas by pyrolysis of high-sulfur sewage sludge”. *J Clean Prod*, t. 334, 130224, 2022.
26. L. Zhu i inni. „Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions”. *Hazard Mater*, t. 1, s. 18, 100167, 2023.
27. T. Wang i inni. „Co-pyrolysis behavior of sewage sludge and rice husk by TG-MS and residue analysis”. *J Clean Prod*, t. 250, 119557, 2020.
28. C. Kanca i inni. „High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery”. *Waste Management*, t. 78, 217-226, 2018.
29. M. Tomas Morgano i inni. „Sewer pyrolysis technology for sewage sludge treatment”. *Waste Management*, t. 73, 487-495, 2018.
30. L. Chen i inni. „Effect of co-combusted sludge in waste incinerator on heavy metals: chemical speciation and environmental risk of horizontal flue ash”. *Waste Management*, t. 102, 645-654, 2020.
31. K. Tian i inni. „Investigation on the Evolution of N-Containing Organic Compounds during Pyrolysis of Sewage Sludge”. *Environ Sci Technol*, t. 48, nr 18, 10888-10896, 2014.
- 32