

Thermal decomposition analysis of wood-based materials

Analiza rozkładu termicznego materiałów drewnopochodnych



DOI: 10.15199/62.2025.5.3

The results of thermal decompn. of softwood sawdust pellets and MFP wood-based board obtained by simultaneous thermal anal. combined with Fourier transform spectroscopy (STA/FT-IR) were presented. Flameless decompn. products were also analyzed using a Purser furnace. The analyses showed differences in the decompn. of the tested materials. Anal. of the products present in the mixts. of emitted gases and smokes showed the presence of C and N oxides, as well as many phenolic compds. and substances from the group of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs).

Keywords: thermal decomposition, identification of decomposition products, FT-IR analysis

Przedstawiono wyniki rozkładu termicznego pelletu z trocin iglastych i płyty drewnopochodnej MFP otrzymanych za pomocą jednoczesnej analizy termicznej połączonej ze spektroskopią z transformatą Fouriera (STA/FT-IR). Przeanalizowano również produkty rozkładu bezpłomieniowego, wykorzystując w tym celu piec Pursera. Przeprowadzone analizy wykazały różnice w rozkładzie badanych materiałów. Analiza produktów obecnych w mieszaninach emitowanych gazów i dymów wykazała obecność tlenków węgla i azotu, jak również wielu związków fenolowych i substancji z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA).

Słowa kluczowe: rozkład termiczny, identyfikacja produktów rozkładu, analiza FT-IR

W ciągu ostatnich kilkunastu lat obserwowany jest wzrost zainteresowania procesami produkcji biopaliw w postaci pelletów, zarówno do użytku domowego, jak i przemysłowego. Jest to wynik poszukiwania rozwiązań mniej inwazyjnych dla środowiska. Coraz częściej na całym świecie prowadzone są dyskusje dotyczące zakończenia stosowania paliw kopalnych, dla których dobrą alternatywą jest biomasa. Procesy spalania biomasy są jednak skomplikowane z 3 głównych powodów. Po pierwsze paliwo to ma bardzo złożony skład chemiczny i fizyczny. Po drugie jego spalanie odbywa się w niekontrolowanym środowisku, a po trzecie zawartość wilgoci, gęstość i niejednorodność tych materiałów mają negatywny wpływ na efektywność spalania¹.

Biomasa drzewna została zidentyfikowana jako źródło energii neutralne pod względem emisji ditlenku węgla, ponieważ rośliny zużywają ditlenek węgla podczas wzrostu². Odpady drewna użytkowego i tworzyw drzewnych, trociny lub wióry są wykorzystywane przez wiele zakładów do produkcji ekologicznego granulatu w postaci pelletu drzewnego, który jest paliwem do kotłów centralnego ogrzewania.

Należy jednak pamiętać, że zgodnie z przepisami dotyczącymi standardów emisyjnych odpadów z drewna użytkowego, np. płyt drewnopochodnych, nie zalicza się do biomasy z powodu obecności surowców innych niż drewno^{3, 4}. Spalanie odpadów z płyt drewnopochodnych



Dr inż. Kamila MIZERA (ORCID: 0000-0001-7427-7588) ukończyła studia magisterskie na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej. W 2021 r. uzyskała stopień doktora w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, obecnie na stanowisku adiunkta. W swojej pracy naukowej zajmuje się tematyką związaną z oceną palności i analizą substancji niebezpiecznych powstających podczas rozkładu i spalania różnych grup materiałów, jak również opracowywaniem metod uniepalniania tworzyw sztucznych. Specjalność – inżynieria materiałowa, badanie palności i emisji dymów, analiza substancji powstających podczas spalania.



Mgr inż. Jan PRZYBYSZ (ORCID: 0000-0002-3958-1581) ukończył studia magisterskie na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej. Obecnie jest asystentem w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych. Specjalność – badanie charakterystyk wybuchowych pyłów palnych oraz parametrów pożarowych.

* Adres do korespondencji:

Zakład Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel.: (22) 623-46-86, fax: (22) 623-36-93, e-mail: kamila.mizera@ciop.pl

prowadzi do większej emisji tlenków azotu i zanieczyszczeń organicznych w porównaniu z typową biomasą drzewną, które pochodzą m.in. od substancji chemicznych, takich jak żywice, kleje i laminaty będące elementem płyt drewnopochodnych⁵⁾.

Jednak zarówno spalanie odpadów z płyt drewnopochodnych, jak i niewłaściwe spalanie pelletu może prowadzić do wielu zagrożeń zarówno dla środowiska, jak i dla bezpieczeństwa użytkowników⁶⁾. Niewłaściwe spalanie pelletu może wynikać z jego niskiej jakości, nieodpowiedniej temperatury spalania oraz niewłaściwego dawkowania paliwa. W wyniku tego powstają spieki w komorze spalania, co zmniejsza efektywność kotła, zwiększa koszty eksploatacji i prowadzi do uszkodzeń mechanicznych. Tym samym może prowadzić do emisji szkodliwych substancji, a w skrajnych przypadkach do wybuchu kotła, co stwarza zagrożenie dla zdrowia i życia.

Celem pracy była analiza rozkładu termicznego i identyfikacja substancji powstających podczas bezpłomieniowego rozkładu pelletu oraz płyty drewnopochodnej. Ma ona służyć ocenie potencjalnych zagrożeń dla zdrowia i środowiska wynikających z emisji tych substancji, zwłaszcza jeśli są to związki szkodliwe, takie jak formaldehyd, dioksyny i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne.

Część doświadczalna

Materiały

Badano pellet z trocin drzew iglastych, który zgodnie z informacją producenta, stanowi w pełni odnawialny opał, pozbawiony jakichkolwiek substancji toksycznych, ze znikomą ilością popiołu po spalaniu. Drugim materiałem była płyta drewnopochodna MFP, która jest płytą wiórową wykonaną z wiórów rozproszonych, skierowanych w różnych kierunkach i połączonych żywicą. Oba badane materiały przedstawiono na rys. 1.

Metodyka badań

Analizę termiczną przeprowadzono za pomocą analizatora termicznego (STA 449F3 Jupiter, Netzsch, Niemcy), wykorzystanego do badania procesu degradacji badanych materiałów pod wpływem temperatury. Próbkę o masie 10 mg umieszczano w tyglach z tlenku glinu i ogrzewano z szybkością 10°C/min w zakresie temp. 25–900°C. Natężenie przepływu powietrza wynosiło 30 mL/min, a natężenie przepływu gazu ochronnego (azotu) wynosiło 20 mL/min.

a)



b)



Fig. 1. Pictures of the tested materials; a) softwood sawdust pellets and b) wood-based board

Rys. 1. Zdjęcia badanych materiałów; a) pellet z trocin drzew iglastych i b) płyta drewnopochodna

Gazy i dymy emitowane podczas pomiarów były bezpośrednio przesyłane do spektrometru w podczerwieni z analizą Fouriera (Bruker Tensor 27 FT-IR) za pomocą linii transmisyjnej, której temperatura wynosiła 230°C. Temperatura wygrzewania celi pomiarowej wynosiła 200°C. Zakres skanowania mieścił się w zakresie liczb falowych 4000–600 cm⁻¹ przy rozdzielczości 4 cm⁻¹.

W piecu Pursera⁷⁾ odzwierciedlono warunki pożaru bezpłomieniowego (faza 1B), zgodnie z normą⁸⁾. Próbkę płyty drewnopochodnej o kształcie listewki o długości 80 cm i masie początkowej 15–20 g oraz próbkę pelletu o masie 15 g umieszczano w łódeczkach kwarcowych o średnicy 41±2 mm i długości 800 mm, o grubości ścianek 2±0,5 mm i wprowadzano do strefy grzejnej pieca z prędkością 40 mm/min, zgodnie z normą⁷⁾.

Próbki gazów i dymów zawierające produkty termicznego spalania pobierano z komory mieszania pieca, stosując technikę mikroekstrakcji do fazy stacjonarnej i poddawano analizie za pomocą chromatografu gazowego (GC 7890 A firmy Agilent Technologies, Hanower, USA) ze spektrometrem masowym (MSD 5975 firmy Agilent Technologies). Do poboru próbek z komory mieszania wykorzystano włókna diwinylobenzenowo/karboksenowo/polidimetylosiloksanowe (DVB/CAR/PDMS) (Supelco, Bellefonte, USA), które są rekomendowane do ekstrakcji i analiz związków niepolarnych i polarnych. Rozdział chromatograficzny uzyskano w kolumnie kapilarnej HP-5MS (30 m, 0,25 mm, 0,25 µm) za pomocą helu jako gazu nośnego podawanego z prędkością 1 mL/min. Piki chromatograficzne zostały zidentyfikowane przez porównanie widm masowych z biblioteką widm NIST MS, uwzględniając tylko związki o prawdopodobieństwie identyfikacji wyższym niż 60%.



Dr inż. Monika BORUCKA (ORCID: 0000-0003-0261-0147) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. W 2014 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych na tym samym wydziale. Obecnie pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym jako adiunkt w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych. Specjalność – chemia analityczna, analiza zanieczyszczeń środowiska, zagrożenia pożarowe, identyfikacja produktów spalania.



Dr Agnieszka GAJEK (0000-0003-2461-5352) w roku 1998 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, a w 2003 r. studia podyplomowe z zakresu bezpieczeństwa procesów przemysłowych na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Stopień doktora uzyskała w 2010 r. w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Jest adiunktem i kierownikiem Pracowni Bezpieczeństwa Chemicznego w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych CIOP-PIB. Specjalność – przeciwdziałanie poważnym awariom przemysłowym i ograniczanie ich skutków.

Table 1. Results of thermal analysis of tested materials

Tabela 1. Wyniki analizy termicznej badanych materiałów

Material	$T_{5\%}$ °C	Δm_1 %	DTG ₁ °C	Δm_2 %	DTG ₂ °C	Δm_3 %	DTG ₃ °C	U_{900} %
Pellet z trocin iglastych	103 (0,2)	5,6 (0,3)	68 (0,1)	62,1 (0,4)	326 (0,5)	29,7 (0,2)	447 (0,3)	2,7 (0,1)
Płyta MFP	236 (0,7)	3,0 (0,1)	83 (0,5)	52,5 (0,4)	326 (0,3)	38,6 (0,6)	503 (0,8)	5,9 (0,2)

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono krzywe ubytku masy (TG) i pochodnej ubytku masy (DTG) zarejestrowane podczas ogrzewania badanych materiałów przy przepływie powietrza 30 mL/min. Z kolei w tabeli 1 zestawiono odczytane z tych krzywych wartości 5-proc. ubytku masy ($T_{5\%}$), utratę masy w każdym z etapów (Δm_i) oraz maksymalne temperatury szybkości utraty masy (DTG_i), jak również pozostałość w temp. 900°C (U_{900}).

Temperatura $T_{5\%}$ uznawana jest za początek degradacji materiału. Wynosiła ona 103°C dla pelletu i 236°C dla płyty. Niższa temperatura początku degradacji $T_{5\%}$ świadczy o dużej ilości substancji lotnych w składzie badanego pelletu. Również w przypadku pozostałości po badaniu (U_{900}) większemu rozkładowi uległ pellet, którego pozostałość w temp. 900°C wynosiła 2,7% masy początkowej.

Na podstawie krzywych DTG (rys. 2) zaobserwowano występowanie 3 etapów degradacji dla każdego z badanych materiałów (tabela 1). Pierwszy etap degradacji występował w temp. 68°C dla pelletu i w 83°C dla płyty. Utrata masy

w tym etapie odczytana z krzywej TG wyniosła odpowiednio 5,6 i 3,0%. Różnica ta wynikała z wcześniejszego początku rozkładu badanego pelletu ($T_{5\%}$). Drugi etap rozkładu wystąpił w temp. 326°C dla obu materiałów. Utrata masy w tym etapie wyniosła 62,1% dla pelletu i 52,5% dla płyty. Z kolei trzeci, ostatni etap wystąpił w temp. 447 i 503°C, odpowiednio dla pelletu i płyty. Etapowi temu towarzyszyły kolejno utraty masy 29,7 i 38,6%.

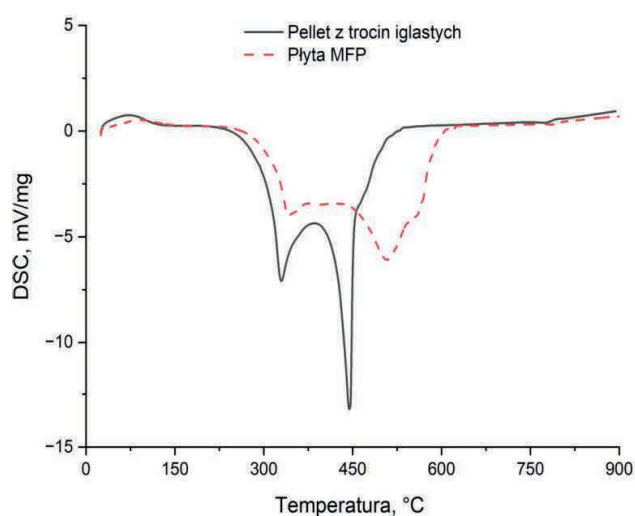


Fig. 3. DSC curves of the tested materials

Rys. 3. Krzywe DSC badanych materiałów

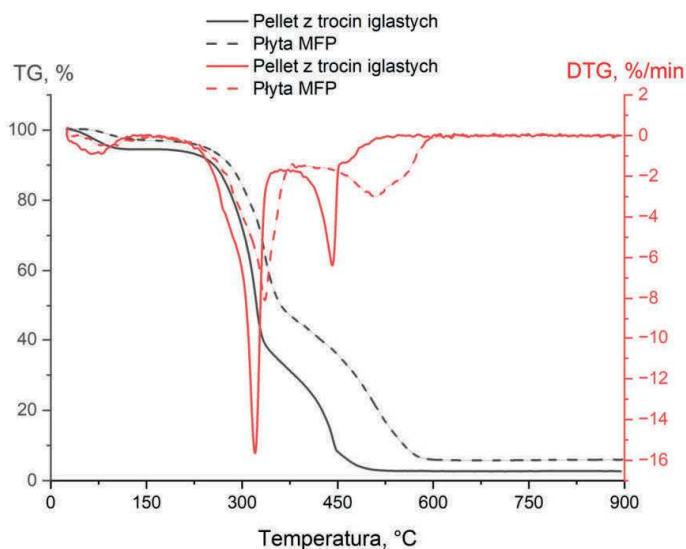


Fig. 2. TG and DTG curves of the tested materials

Rys. 2. Krzywe TG i DTG badanych materiałów

Table 2. Results of differential scanning calorimetry of the tested materials

Tabela 2. Wyniki różnicowej kalorymetrii skaningowej badanych materiałów

Material	T_{endo1} °C	T_{endo2} °C	T_{exo1} °C	T_{exo2} °C	T_{exo3} °C	T_{exo4} °C
Pellet z trocin iglastych	77 (0,3)	335 (0,4)	-	450 (0,4)	-	778 (0,7)
Płyta MFP	83 (0,4)	-	334 (0,3)	502 (0,6)	615 (0,2)	779 (0,1)

Na rys. 3 przedstawiono krzywe DSC zarejestrowane podczas ogrzewania materiałów przy przepływie powietrza 30 mL/min. W tabeli 2 zamieszczono temperatury przemian fazowych odczytane z tych krzywych. Charakter krzywych był różny dla pelletu i płyty. W przypadku pelletu obserwowano 2 piki endotermiczne (T_{endo1} i T_{endo2}) i 2 piki egzotermiczne (T_{egzo2} i T_{egzo4}). W przypadku płyty występował 1 pik endotermiczny (T_{endo1}) i 4 piki egzotermiczne (T_{egzo1} – T_{egzo4}).

Piki endotermiczne występowały w temperaturach zbliżonych do temperatur etapów degradacji wyznaczonych z krzywych DTG. Przemiany te były związane z wymianą ciepła z otoczeniem. Piki egzotermiczne T_{egzo3} i T_{egzo4} dla płyty i T_{egzo4} dla pelletu występowały w temperaturach odpowiednio 615 i 779°C dla płyty i 778°C dla pelletu. Przemiany te były związane z dalszym wypalaniem karbonizatu⁹⁾.

Przez połączenie metod wykorzystujących analizator termiczny STA oraz FT-IR uzyskano widma 3D-IR produktów gazowych emitowanych podczas rozkładu

Table 3. List of chemicals identified in the gas mixture formed during flameless decomposition at 350°C

Tabela 3. Wykaz substancji chemicznych zidentyfikowanych w mieszaninie gazów powstającej podczas rozkładu bezpłomieniowego w 350°C

Zidentyfikowany produkt	Nr CAS produktu	Udział poszczególnych produktów, %	
		pellet z trocin iglastych	plyta MFP
CO _x , NO _x , H ₂ O	-	2,50	7,02
N-metoksykarbonyloksy-1,1-dimetyloetyloamina	NIST: 284261	-	1,29
Kwas octowy	64-19-7	2,19	2,25
Furfural	98-01-1	1,02	1,75
2-Furanometanol	98-00-0	1,46	2,57
2-Hydroksycyklopent-2-en-1-on	10493-98-8	1,39	-
2(5H)-Furanon	497-23-4	-	2,40
3-Metoksypirydyna	7295-76-3	-	1,13
Fenol	108-95-2	-	1,11
3-Metylo-1,2-cyklopentanodion	765-70-8	-	3,13
2-Metoksyfenol	90-05-1	3,20	10,79
Kreozol	93-51-6	4,37	9,36
4-Etylo-2-metoksyfenol	2785-89-9	2,71	6,21
2-Metoksy-4-winylofenol	7786-61-0	2,45	3,47
2,6-Dimetoksyfenol	91-10-1	2,02	-
2-Metoksy-4-propylofenol	2785-87-7	0,95	1,34
4-Hydroksy-3-metoksyfenylo-aceton	2503-46-0	1,57	-
2,6-Dimetoksy-4-(2-propenylo)-fenol	6627-88-9	1,33	-

*wybrane produkty, których udział wynosił ponad 1%

termicznego badanych materiałów. Uzyskane widma zestawiono na rys. 4.

W 1. etapie rozkładu (DTG₁) nie zaobserwowano wydzielania się produktów. Dopiero w 2. etapie rozkładu (DTG₂) pojawiły się piki związane z wydzielaniem się ditlenku węgla (CO₂), tlenku węgla (CO), pary wodnej oraz substancji organicznych. Pasma od CO₂ znajdowały się w zakresie liczb falowych 3730–3600, 2360–2342 i 720–617 cm⁻¹. W przypadku CO obserwowano 2 charakterystyczne piki w okolicy liczb falowych 2172 i 2117 cm⁻¹. W 2. etapie roz-

kładu obserwowano niewielkie piki w zakresie liczb falowych 4000–3500 cm⁻¹, które świadczyły o obecności wody lub innych lotnych związków zawierających grupy funkcyjne –OH. Węglowodory aromatyczne występowały w zakresie liczb falowych 1600–1450 cm⁻¹. Widoczne były również pojedyncze piki w zakresie liczb falowych 1200–1000 cm⁻¹, które pochodziły od związków zawierających wiązania C–O rozciągające. W 3. etapie rozkładu (DTG₃) obserwowano głównie wydzielanie się CO₂ oraz CO.

Liczbę substancji wykrytych i zidentyfikowanych w temp. 350°C w warunkach rozkładu bezpłomieniowego odtworzonych w piecu Pursera przedstawiono na rys. 5. Analiza dymu powstałego podczas badania w warunkach symulujących rozkład bezpłomieniowy zachodzący w temp. 350°C wykazała obecność wielu substancji, a główne z nich zestawiono w tabeli 3.

Oprócz produktów, takich jak tlenki węgla i azotu, w mieszaninach emitowanych gazów i dymów wykryto również wiele związków fenolowych i substancji z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Furfural jest związkiem pochodzącym z biomasy,

otrzymywanym w wyniku hydrolizy i odwodnienia ksylanu w lignocelulozie, który zawiera grupę aldehydową w swojej cząsteczce i sprzężony układ podwójnych wiązań w pierścieniu furanowym¹⁰. Furfural jest substancją toksyczną i drażniącą; ma toksyczny wpływ na drogi oddechowe i działa drażniąco na oczy. Kreozol to fenolowy związek aromatyczny, który jest składnikiem kreozotu drzewnego, będącego składnikiem smoły drzewnej, produktu suchej destylacji drewna¹¹ (jest on emitowany m.in. z gazów kominowych podczas spalania niedostatecznie

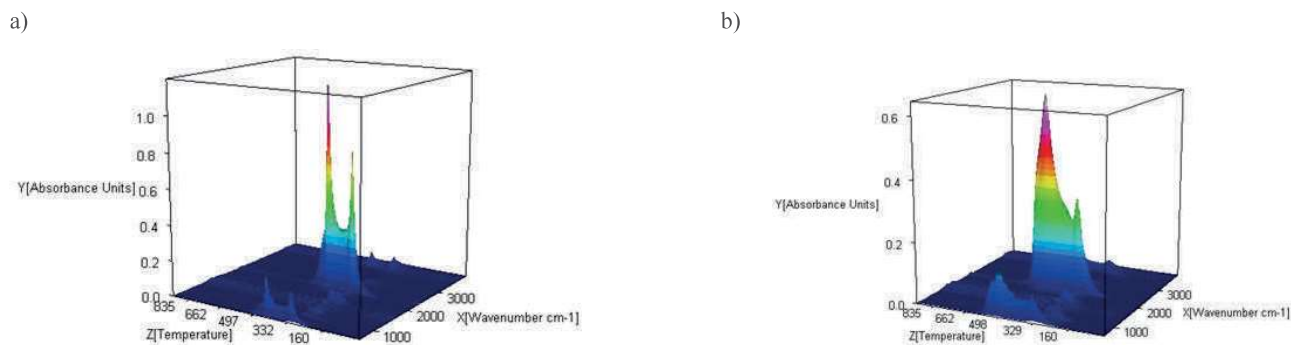


Fig. 4. 3D-IR spectra of gaseous products emitted during thermal decomposition of a) softwood sawdust pellets and b) wood-based board

Rys. 4. Widma 3D-IR produktów gazowych emitowanych podczas termicznego rozkładu a) pelletu z trocin iglastych i b) płyty drewnopochodnej

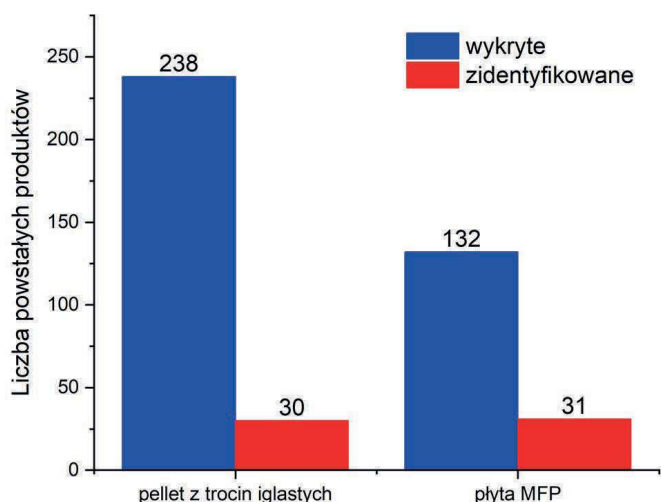


Fig. 5. Number of detected and identified products formed during flameless decomposition of tested materials

Rys. 5. Liczba wykrytych i zidentyfikowanych produktów powstałych podczas rozkładu bezpłomieniowego badanych materiałów

wysuszonego drewna). Krezol działa drażniaco na oczy i skórę. Związki fenolowe są substancjami szkodliwymi i działają toksycznie na organizmy wodne, powodując długotrwałe negatywne skutki¹²⁾.

Podsumowanie

Zagrożenie związane z pożarem związane jest nie tylko z ogniem i wysoką temperaturą, ale w wielu przypadkach główną przyczyną zgonów ofiar jest dym, w którym znajdują się niebezpieczne substancje powstające podczas rozkładu termicznego i spalania materiałów. Dane literaturowe wskazują, że zbyt niska temperatura spalania pelletu w kotle lub próba zastąpienia go materiałami drewnopochodnymi prowadzi do powstawania wielu niebezpiecznych substancji chemicznych, które mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi i środowiska.

Pellet z trocin drzew iglastych i płyta drewnopochodna MFP wykazują odmienny charakter rozkładu, zarówno pod względem temperatury początku rozkładu, jak i składu emitowanych produktów. Pellet zaczyna się rozkładać w znacznie niższej temperaturze (103°C) niż płyta MFP (236°C), co wskazuje na wyższą termostabilność płyty drewnopochodnej. Jednakże zarówno w przypadku pelletu, jak i płyty MFP w trakcie bezpłomieniowego rozkładu termicznego emitowane są niebezpieczne związki chemiczne, m.in. tlenki węgla i azotu, związki fenolowe oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, takie jak krezol, furfural i 2-metoksifenol. Z kolei w warunkach symulowanego pożaru (350°C) płyta MFP emituje wyraźnie

większe ilości toksycznych związków w porównaniu z peluletem, co ma związek z obecnością żywic, klejów i innych dodatków chemicznych stosowanych przy jej produkcji. Zidentyfikowane związki chemiczne mają właściwości toksyczne, drażniące i kancerogenne.

Uzyskane wyniki podkreślają konieczność świadomego wyboru paliwa do spalania. Stosowanie odpadów drewnopochodnych (np. MFP) jako alternatywy dla pelletu może prowadzić do zwiększonego zagrożenia dla zdrowia i środowiska, szczególnie w warunkach niewłaściwego spalania.

Przeprowadzona analiza rozkładu materiałów na bazie drewna może zostać wykorzystana w projektowaniu nowych materiałów o zmniejszonej dymotwórczości oraz w działaniach edukacyjnych zwiększających świadomość użytkowników na temat zagrożeń związanych z niewłaściwym wykorzystaniem biomasy lub jej zamienników do tego nieprzeznaczonych.

Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej. Zadanie nr 3.ZS.08, pt. „Analiza emisji zanieczyszczeń do powietrza podczas spalania płyt drewnopochodnych i powstającego z nich pelletu”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Otrzymano: 04-04-2025

Zrecenzowano: 30-04-2025

Zaakceptowano: 08-05-2025

Opublikowano: 19-05-2025

LITERATURA

- [1] M.V. Gil, P. Oulego, M.D. Casal, C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera, *Biores. Technol.* 2010, **101**, 8859.
- [2] J. Ahn, H.J. Kim, *Renew. Energy* 2020, **145**, 391.
- [3] Dyrektywa 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), *Dz.U. UE L* z dnia 17 grudnia 2010 r.
- [4] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, *Dz.U.* 2020, poz. 1860.
- [5] R. Wasielewski, *Archiv. Waste Manag. Environ. Prot.* 2019, **21**, 1.
- [6] Portal Smog LAB, <https://smoglab.pl/palenie-meblami-w-piecu>, dostęp 11.03.2025 r.
- [7] ISO/TS 19700:2016, *Controlled equivalence ratio method for the determination of hazardous components of fire effluents. Steady-state tube furnace*, Geneva 2016.
- [8] ISO 19706:2011, *Guidelines for assessing the fire threat to people*, Geneva 2011.
- [9] A. Kijo-Kleczkowska, A. Gnatowski, M. Gajek, M. Szumera, *Rynek Energii* 2023, nr 2 (165), 60.
- [10] S. Sun, F. Wang, W. Zhang, K. Zhao, X. Liu, *Cat. Comm.* 2024, **187**, 106864.
- [11] Z. Zhang, L. Wang, X. Zhou, *J. Mol. Liq.* 2023, **390**, 123120.
- [12] M. Borucka, M. Celiński, *Chem. Eng. Trans.* 2019, **77**, 139.