

Dr hab. inż. Dorota Musiał

Politechnika Częstochowska
ORCID: 0000-0002-0667-3033
e-mail: dorota.musial@pcz.pl

Unieszkodliwianie ciekłych odpadów przemysłowych w warunkach laboratoryjnych

Neutralization of industrial liquid waste in laboratory conditions

Streszczenie

Szybki rozwój techniki i nowoczesnych gałęzi przemysłu sprzyja wzrostowi ilości wytwarzanych odpadów. Wiąże się z tym poważne problemy ekologiczne i ekonomiczne, które muszą być kontrolowane i na bieżąco rozwiązywane zgodnie z wymogami ochrony środowiska. Wczesne rozpoznanie zagrożenia, jakie niesie ze sobą nieodpowiednie gospodarowanie odpadami, pozwala w krótkim czasie podjąć trafne decyzje, które będą bezpieczne, możliwe do zaakceptowania przez społeczeństwo i zapewne związane z dużo mniejszymi kosztami. Konieczne są działania zarówno wytwórców, jak i obywateli, ukierunkowane na opracowanie skutecznych sposobów unieszkodliwiania odpadów.

W niniejszej pracy podjęto próbę analizy i wyjaśnienia zagadnień związanych z termicznym unieszkodliwieniem palnych odpadów przemysłowych. Celem pracy było wykorzystanie powyższych odpadów przede wszystkim do celów energetycznych. Tę procedurę można stosować w różnych już istniejących procesach technologicznych. Termiczna utylizacja zachodzi w różnego typu komorach, a instalacje są dobierane indywidualnie do każdego rodzaju odpadów ze względu na różnorodność ich właściwości.

Słowa kluczowe:

ciekłe odpady przemysłowe, oleje odpadowe, efektywna gospodarka materiałowa

Abstract

The fast development of technology and modern branches of industry is conducive to the increase in the amount of generated waste. This is associated with serious ecological and economic problems that must be controlled and solved on an ongoing basis in accordance with the requirements of environmental protection. Early recognition of the threat posed by inappropriate waste management allows to make the right decisions in a short time, which will be safe, acceptable to society and probably associated with much lower costs. Action is needed both by producers and citizens, aimed at developing effective methods of waste disposal.

This paper attempts to analyze and explain the issues related to the thermal neutralization of combustible industrial waste. The purpose of the study was to use the above-mentioned wastes primarily for energy purposes. This procedure can be applied to various already existing technological processes. Thermal utilization takes place in various types of chambers, and the installations are selected individually for each type of waste due to the variety of their properties.

Keywords:

industrial liquid waste, waste oils, effective material management

JEL: Q53, Q57

Wprowadzenie

Krajowy plan gospodarki odpadami (KPGO) powstał na podstawie rozporządzenia wynikającego z ustawy z 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Rada Ministrów, 2012). Zarówno KPGO 2022, jak i poprawki do niego, czyli uchwała nr 57 Rady Ministrów, zawierają szereg zadań w zakresie gospodarowania od-

padami, które należy zrealizować w kolejnych latach aż do roku 2022 z uwzględnieniem perspektywy do 2030 r. (Rada Ministrów, 2016, 2021). Co istotne dla prawodawstwa polskiego, KPGO powstał z zachowaniem zgodności z rozporządzeniami Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE (Parlament Europejski, 2008). Zgodnie z wymienionymi rozporządzeniami podczas postępowania z odpadami należy

dążyć do zapobiegania i minimalizacji powstawania odpadów, zapewnić odzysk odpadów (głównie recykling), unieszkodliwiać odpady (poza składowaniem), a w ostateczności bezpiecznie dla zdrowia ludzkiego i środowiska składować odpady, których nie da się poddać procesom odzysku lub unieszkodliwiania ze względu na warunki techniczno-ekonomiczne.

Dla potrzeb KPGO dokonano podziału odpadów na 4 grupy, do których zaliczono:

- odpady powstające w sektorze komunalnym (m.in. odpady żywności i inne odpady ulegające biodegradacji),
- odpady powstające z produktów (oleje odpadowe, wyczerpane baterie i akumulatory, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, pojazdy wycofane z eksploatacji, zużyte opony oraz odpady opakowaniowe),
- odpady niebezpieczne (odpady zawierające PCB, odpady zawierające azbest, odpady medyczne i weterynaryjne oraz mogilniki),
- odpady pozostałe (odpady z budowy i remontów, odpady z procesów termicznych, komunalne osady ściekowe).

Ciekłe odpady przemysłowe to w znacznej mierze oleje odpadowe zaklasyfikowane jako odpady powstające z produktów. Odpady te zostały objęte tzw. zasadą rozszerzonej odpowiedzialności producenta (ang. *Extended Producer Responsibility*). Zgodnie z tą zasadą ciężar odpowiedzialności za powstawanie i zagospodarowanie powyższych odpadów został przeniesiony na producentów olejów. Producenci są więc zobowiązani do finansowania i organizowania systemów zbierania i przetwarzania odpadów. Celem tego jest zachęcenie producentów do przeprojektowania produktów w taki sposób, aby zmniejszyć udział odpadów przeznaczonych jedynie do składowania, a zwiększyć możliwości ich recyklingu.

Obróbka termiczna odpadów ciekłych — podejście procesowe

Ciekłe odpady poprodukcyjne należy w pierwszej kolejności poddać procesom odzysku przez regenerację, której głównym celem jest usunięcie z odpadów zanieczyszczeń, produktów utleniania i wszelkich niepotrzebnych dodatków zawartych w ich składzie (Minister Gospodarki, 2015). W wyniku regeneracji uzyskuje się oleje bazowe. Podstawą klasyfikacji przepracowanych substancji do procesu regeneracji jest kryterium zawartości w oleju PCB i Cl (<50 mg/kg PCB; < 0,2% wagowo Cl). Jeśli powyższe kryterium nie jest spełnione, oleje są kwalifikowane jako produkty do unieszkodliwiania. W literaturze można odnaleźć różne sposoby

unieszkodliwiania odpadów, jednakże termiczna utylizacja ze względu na swe zalety zasługuje na szczególną uwagę.

Poprzez termiczne przekształcanie odpadów rozumie się procesy utleniania odpadów, w tym spalania, zgazowania lub rozkładu odpadów, prowadzone w przeznaczonych do tego instalacjach lub urządzeniach (Rada Ministrów, 2012). Termiczna utylizacja umożliwia wykorzystywanie wszelkich produktów odpadowych jako surowców wtórnych do przerobu, którego głównym celem jest odzysk energetyczny, wpływający na zmniejszone wykorzystanie paliw konwencjonalnych w danym procesie (Bala-Litwiniak, 2021; Marculescu, 2012; Musiał, 2020, 2021).

Przebieg procesu termicznego może mieć następującą metodykę (Da Silva i in., 2012; Stapf i in., 2020):

- 1) wstępne przygotowanie odpadów — polega na rozdrabnianiu, mieszaniu, ujednolicaniu, magazynowaniu, transportowaniu oraz dozowaniu;
- 2) spalanie odpadów w wysokich temperaturach (ten etap przebiega zazwyczaj w 600–1200°C), w których zachodzą następujące procesy: suszenie, wytłewanie, właściwe spalanie oraz dopalanie;
- 3) ochładzanie gazów odlotowych do temperatury ok. 250°C przy użyciu powietrza lub wody, z odzyskiem lub bez odzysku ciepła;
- 4) oczyszczanie gazów na sucho lub mokro w urządzeniach takich jak: cyklony, filtry lub płuczki.

Ogromna zmienność własności odpadów poprodukcyjnych powoduje, iż każdorazowo należy opracować technologię i konstrukcję urządzeń wykorzystywanych do ich termicznego przetworzenia (Wang i in., 2022; Xue i in., 2015). Do własności tych można zaliczyć: stan skupienia odpadów, ich wartość opałową, zawartość części palnych i niepalnych, zawartość szkodliwych pierwiastków, możliwość wykorzystania ciepła odpadowego oraz temperaturę zapłonu (Bala-Litwiniak i Radomiak, 2016; Glushkov i in., 2020; Musiał, 2020; Musiał i in., 2015).

W tabeli 1 przedstawiono możliwości termicznego unieszkodliwiania odpadów poprodukcyjnych w zależności od ich stanu skupienia.

Metodyka badań

Unieszkodliwianie ciekłych odpadów przemysłowych przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym przedstawionym na rysunkach 1 i 2. Piec, w którym spalanie odpadów ma charakter strumieniowy, wykorzystywane są najczęściej do utylizacji odpadów ciekłych, a więc takich, które można wtryskiwać do komory.

Tabela 1

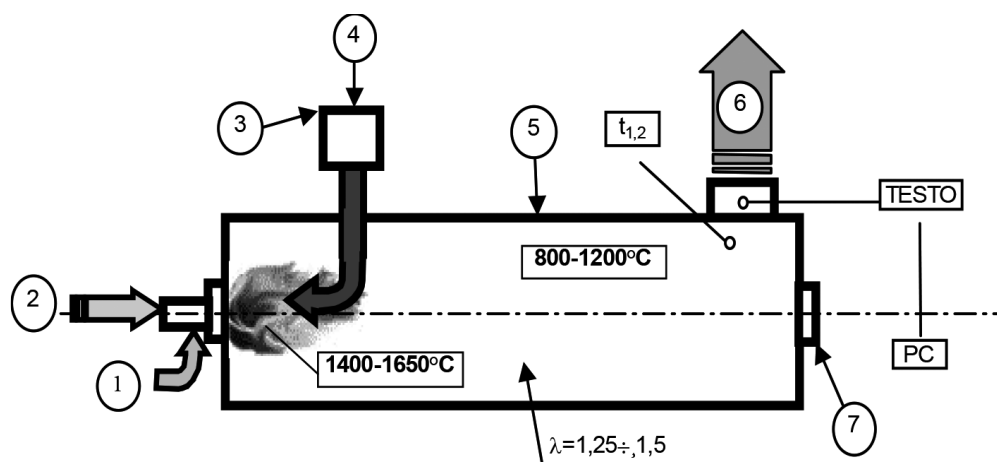
Wybrane sposoby termicznej utylizacji odpadów poprodukcyjnych

Rodzaje procesów wykorzystywanych do utylizacji odpadów	Temperatura procesu [°C]	Rodzaj odpadów		
		stałe	ciekłe	gazowe
Piroliza kompleksowa	500–880	x	x	x
Spalanie strumieniowe	800–1200		x	x
Spalanie w piecu obrotowym	650–1350	x	x	
Spalanie w złożu fluidalnym	800–900	x	x	x

Źródło: opracowanie na podstawie badań własnych oraz Da Silva i in., 2012; Marculescu, 2012; Stapf i in., 2020; Xue i in., 2015.

Rysunek 1

Schemat stanowiska do spalania odpadów ciekłych w komorze z wykorzystaniem palnika gazowego



Legenda: 1 — gaz, 2 — powietrze, 3 — sprężone powietrze, 4 — odpad, 5 — komora spalania, 6 — odciąg spalin, 7 — wizualizacja procesu.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2

Stanowisko pomiarowe do spalania odpadów ciekłych w komorze z wykorzystaniem palnika gazowego — widok ogólny



Źródło: opracowanie własne.

Głównym elementem stanowiącym układ pomiarowy jest pozioma komora spalania, złożona z kręgów ceramicznych, zaizolowana matą MT-3, opancerzona blachą stalową. Na wlocie komory usytuowany jest dyfuzyjny palnik gazowy. Palnik może być umieszczony osiowo, promieniowo lub stycznie. Gaz do palnika poprzez rotametr jest pobierany z sieci, a powietrze, również poprzez rotametr, podawane jest z wentylatora. Na długości komory rozmieszczone są otwory manewrowe i pomiarowe.

Rozpylone pneumatycznie ciekłe odpady wprowadzane są prostopadłe do osi wzdłużnej uprzednio nagrzanej komory w odległości 0,25 m od płaszczyzny czołowej palnika gazowego. Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na skuteczność całego procesu spalania jest wysoki stopień rozpylenia materiału odpadowego. Po rozpyleniu odpadów, następuje ich spalanie wewnątrz komory w zawieszeniu. Temperatura płomienia utrzymywana jest na poziomie 1400–1650°C. Temperatura warunkująca przebieg procesu wewnątrz komory jest utrzymywana w granicach od 800 do 1200°C.

Ciekły odpad stanowiły: ftalan, zużyty rozpuszczalnik nitro, zanieczyszczona benzyna, przepracowany olej transformatorowy, olej przekładniowy, olej hartowniczy, olej silnikowy oraz odpad porafinacyjny.

Wyniki badań

Do badań użyto odpadów ciekłych z zakładów przemysłowych, lakierniczych, mechaniki samochodowej oraz ze stacji paliw. Substancją wzorcową, do której odniesiono uzyskane wyniki, był olej napędowy. Określono takie właściwości odpadów, jak: za-

wartość wilgoci, zawartość popiołu, gęstość oraz ciepło spalania. Ze względu na brak możliwości technicznych wyznaczenia zawartości PCB i chloru przyjęto, iż są to odpady poprodukcyjne, których regeneracja do olei bazowych w warunkach prowadzonego eksperymentu jest niemożliwa. W związku z tym zakwalifikowano odpady jako substancje nadające się do unieszkodliwienia w sposób termiczny w celu odzysku energii.

Zawartości wilgoci oraz popiołu w rozpatrywanych materiałach mieściły się w zakresie 0–3%. Gęstość dla większości badanych materiałów mieściła się w granicach 0,8–0,9 g/cm³ (rysunek 3). W przypadku benzyny zaobserwowano niższe wartości, na poziomie 0,69 g/cm³, natomiast ftalan oraz odpad porafinacyjny charakteryzowały się wyższymi wartościami: odpowiednio 0,99 i 1,3 g/cm³.

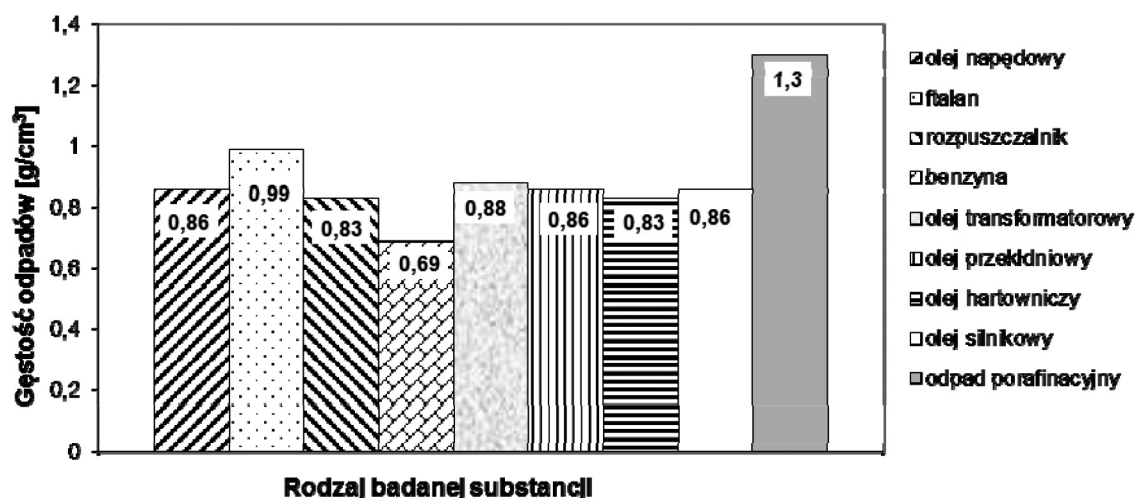
Z przeprowadzonych badań wynika, iż ciepło spalania oleju przekładniowego było zbliżone do ciepła spalania oleju napędowego. Niższe ciepło spalania miały: ftalan, rozpuszczalnik nitro i odpad porafinacyjny. Pozostałe odpady (benzyna, olej transformatorowy, olej hartowniczy, olej silnikowy) miały ciepło spalania wyższe od oleju napędowego. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.

Następny etap badań prowadzono w komorze ceramicznej ze strumieniowym, pneumatycznym rozpyleniem spalin. Podczas spalania poszczególnych odpadów ustalono, jak zachodzi termiczna utylizacja, jak kształtuje się płomień w komorze i jaka jest emisja toksycznych składników spalin do atmosfery. Każdą próbkę odpadów spalono osobno. Następnie wszystkie odpady w równych częściach zmieszano ze sobą i spalono.

Eksperyment prowadzono we wstępnie rozgrzanej komorze do temperatury $t \approx 800^\circ\text{C}$ opalanej ga-

Rysunek 3

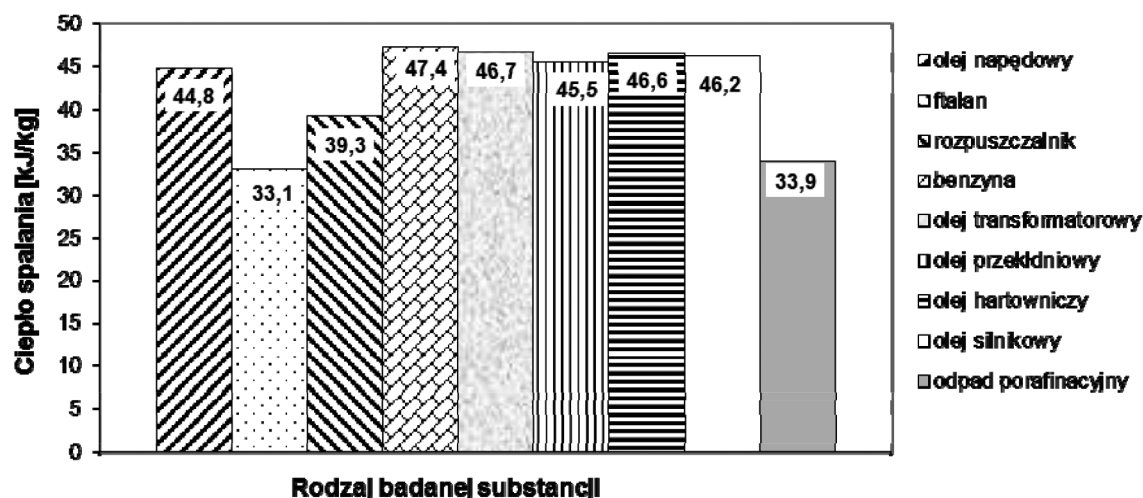
Gęstość badanych odpadów



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 4

Ciepło spalania badanych odpadów



Źródło: opracowanie własne.

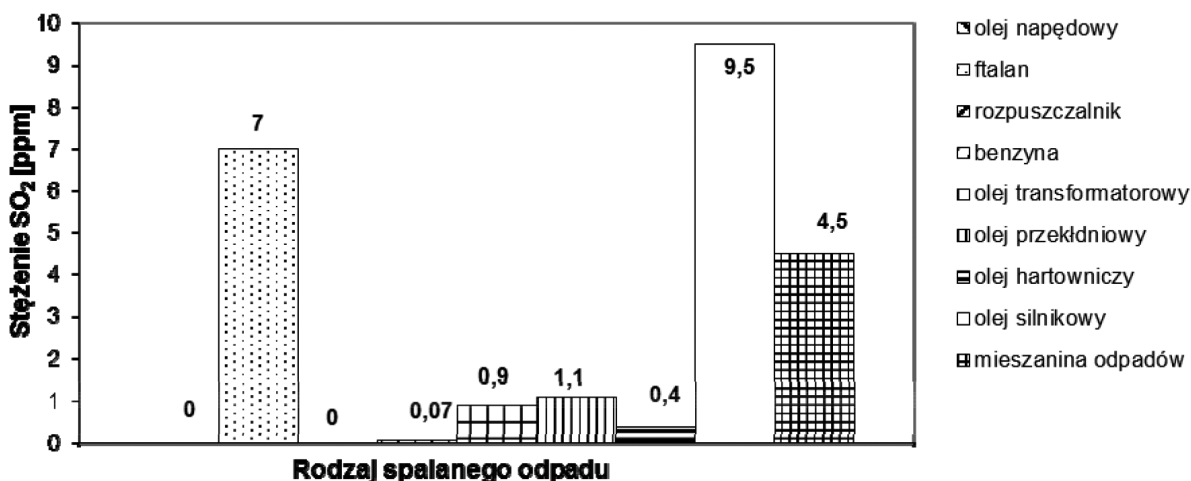
zem ziemnym przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda \approx 1,15$. Następnie obniżano strumień gazu ($\lambda_g \approx 2,85$). Powietrze nadmiarowe zużywano podczas spalania rozpylonego odpadu wprowadzonego prostopadle do osi komory. Globalny współczynnik nadmiaru powietrza utrzymywano w granicach $\lambda_T = 1,2 \div 1,6$.

Emisję SO_2 w spalinach przedstawiono na rysunku 5, a NO na rysunku 6. Z rysunku 5 można wywnioskować, że emisja do atmosfery szkodliwych związków siarki z procesów spalania takich odpadów jak: rozpuszczalnik nitro, benzyna, olej transformatorowy, olej przekładniowy oraz olej hartowniczy

jest znikoma (0–1 ppm), porównywalna do emisji tych związków z procesów spalania gazu ziemnego oraz oleju napędowego. Natomiast emisja SO_2 podczas spalania w tych samych warunkach mieszaniny odpadów osiągnęła wartość 4,5 ppm, na co miała wpływ zawartość tego związku we ftalanie oraz przetworzonym oleju silnikowym.

Na podstawie rysunku 6 stwierdzono, że emisja NO w przypadku spalania ftalanu oraz mieszaniny odpadów była porównywalna do emisji tego związku podczas spalania oleju napędowego. Niewiele większą wartość uzyskano przy spalaniu rozpuszczalnika i oleju przekładniowego. Natomiast benzyna, olej

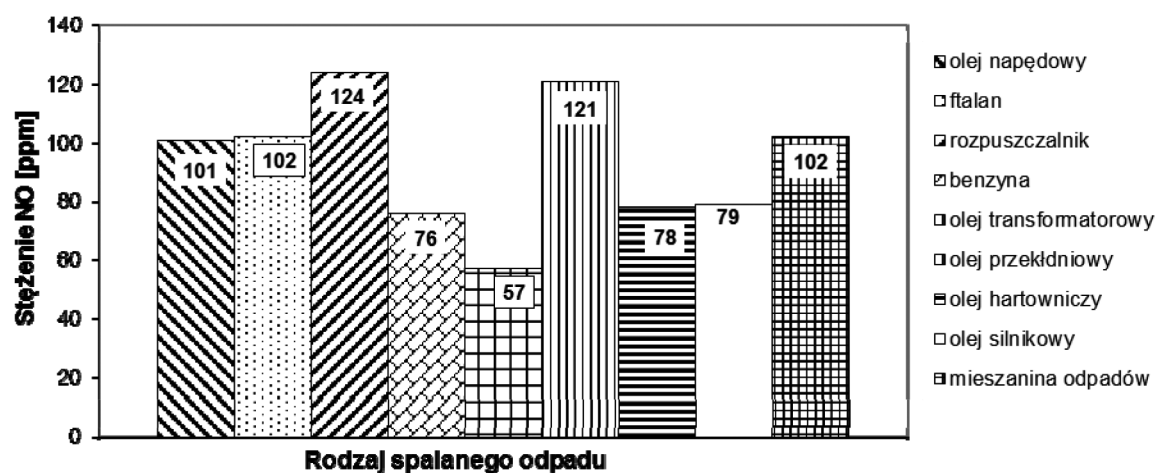
Rysunek 5

Średnie wartości stężeń SO_2 przy stałych parametrach wejściowych procesów

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6

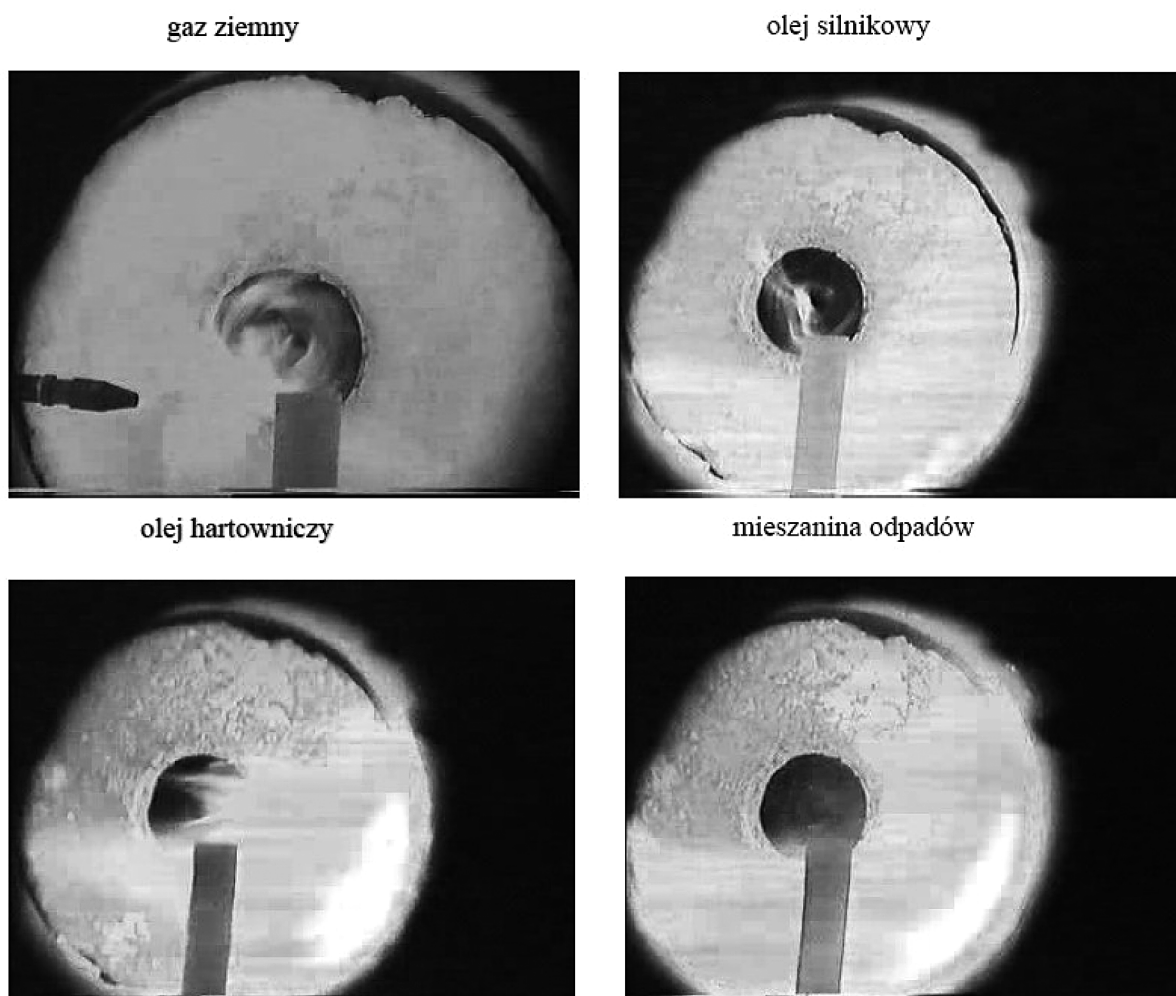
Średnie wartości stężeń NO przy statycznych parametrach wejściowych



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7

Wizualizacja procesu spalania



Źródło: opracowanie własne.

transformatorowy, olej hartowniczy oraz olej silnikowy wyemitowały NO w ilościach mniejszych, zawartych w granicach od 60 do 80 ppm.

Na rysunku 7 przedstawiono wybrane obrazy wizualizacji procesu spalania poszczególnych odpadów w komorze ceramicznej podczas strumieniowego rozpylania. Pierwsze ujęcie obrazuje próbę usytuowania dyszy rozpylającej na tle wylotu gazu z dyszy palnikowej. Ze względów bezpieczeństwa dyszę rozpylającą wycofano do płaszczyzny wewnętrznej ścian komory i wszystkie próby prowadzono w takich warunkach. Kolejne ujęcia prezentują kształt płomienia z rozpylonych odpadów. Płomień ten wykazywał zawirowanie przeciwne do kierunku zawirowania płomienia gazowego, co z punktu aerodynamicznego wprowadzania dwóch strug jest korzystne.

Podsumowanie

Odpowiednie podejście i sam wybór technologii, która ma być stosowana do przetwarzania oleju poprodukcyjnego, ma istotne znaczenie dla promowania właściwego zarządzania środowiskiem. Należy dążyć do zapewnienia racjonalizatorskich metod

ograniczania, recyklingu i ponownego wykorzystania oleju. Olej, który nie spełnia wymogów recyklingowych, musi trafić do procesu unieszkodliwienia. Wybór metody unieszkodliwiania zależy od właściwości fizykochemicznych odpadów oraz dostępności urządzeń do ich przetwarzania.

Badane odpady mają wysokie ciepło spalania, w związku z czym mogą być wykorzystane do celów energetycznych. Pożądane efekty termicznego unieszkodliwienia odpadów uzyskuje się w przypadku prawidłowego ich rozpylenia w komorze spalania. Biorąc pod uwagę efekt ekologiczny, oleje odpadowe można spalać w istniejących urządzeniach opalanych np. olejem opałowym bez konieczności zbędnych nakładów na budowę nowych instalacji i bez szkody dla tych urządzeń. Uzyskane wartości emisji mierzonych składników spalin mieściły się w granicach wartości emitowanych podczas spalania oleju napędowego. Należy zaznaczyć, iż bardzo istotne jest określenie poziomu innych istotnych związków w spalinach, m.in. PCB, Cl, WWA oraz zawartości metali (Al, Si). Ze względu na ograniczone możliwości techniczne, wymaga to skomplikowanej i kosztownej analizy instrumentalnej, powyższe analizy nie zostały przeprowadzone dla potrzeb niniejszego artykułu.

Bibliografia/References

- Bala-Litwiniak, A. (2021). Environmental and economic aspects of combustion of biomass pellets containing a waste glycerol. *Combustion Science and Technology*, 193(11), 1998–2008. <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1746774>
- Bala-Litwiniak, A., Radomiak, H. (2016). Environmental benefits of co-combustion of light fuel oil with waste glycerol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 38(17), 2510–2516. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1091867>
- Da Silva, L. J., Alves, F. C., De França, F. P. (2012). A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Management and Research*, 30(10), 1016–1030. <https://doi.org/10.1177/0734242X12448517>
- Glushkov, D. O., Feoktistov, D. V., Kuznetsov, G. V., Batishcheva, K. A., Kudelova, T., Paushkina, K. K. (2020). Conditions and characteristics of droplets breakup for industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air. *Fuel*, 265 (April). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116915>
- Marculescu, C. (2012). Comparative analysis on waste to energy conversion chains using thermal-chemical processes. *Energy Procedia*, 18, 604–611. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.073>
- Minister Gospodarki (2015). Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 5 października 2015 r. w sprawie szczegółowego sposobu postępowania z olejami odpadowymi. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150001694> (30.09.2021).
- Musiał, D. (2020). Coke and blast furnace gases: ecological and economic benefits of use in heating furnaces. *Combustion Science and Technology*, 192(6), 1015–1027. <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1605990>
- Musiał, D. (2021). Optimization of the coke oven gas combustion process in an experimental heating chamber. *Przemysł Chemiczny*, 100(4), 347–349. <https://doi.org/10.15199/62.2021.4.5>
- Musiał, D., Radomiak, H., Zajemska, M., Wyleciał, T. (2015). Ekonomiczno-ekologiczny aspekt energetycznego wykorzystania wybranych nośników energii. *Logistyka*, 6, 288–291.
- Parlament Europejski (2008). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy.
- Rada Ministrów (2012). Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU-20130000021> (30.09.2021).
- Rada Ministrów (2016). Uchwała Nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022. <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WMP20160000784> (30.09.2021).
- Rada Ministrów (2021). Uchwała nr 57 Rady Ministrów z dnia 6 maja 2021 r. zmieniająca uchwałę w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami. <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/krajowy-plan-gospodarki-odpadami/uchwala-nr-57-rady-ministrow-z-dnia-6-maja-2021-r-zmieniajaca-uchwale-w-sprawie-krajowego-planu-gospodarki-odpadami-2022> (30.09.2021)
- Stapf, D., Ciceri, G., Johansson, I. (2020). *Trends and drivers in alternative thermal conversion of waste (September)*. IEA Bioenergy: Task 36.

- Wang, X., Li, C., Lam, C. H., Subramanian, K., Qin, Z. -H., Mou, J. -H., Jin, M., Chopra, S. S., Singh, V., Ok, Y. S., Yan, J., Li, H. -Y., Lin, C. S. K. (2022). Emerging waste valorisation techniques to moderate the hazardous impacts, and their path towards sustainability. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127023. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127023>
- Xue, Y., Zhou, S., Brown, R. C., Kelkar, A., Bai, X. (2015). Fast pyrolysis of biomass and waste plastic in a fluidized bed reactor. *Fuel*, 156, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.033>

Dr hab. inż. Dorota Musiał

W 2002 r. ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej. W 2019 r. uzyskała stopień doktora habilitowanego nauk technicznych. Jest adiunktem w Katedrze Zarządzania Produkcją tej Uczelni. Specjalność — spalanie paliw i odpadów, emisja zanieczyszczeń powietrza, numeryczne modelowanie.

Dr hab. inż. Dorota Musiał

In 2002, graduated from the Faculty of Process, Materials and Applied Physics at the Częstochowa University of Technology. In 2019, she obtained a postdoctoral degree in technical sciences. She is an assistant professor at the Department of Production Management of this University. Specialty — fuel and waste combustion, air pollutant emission, numerical modeling.

Material Economy and Logistics Journalwww.pwe.com.pl**Gospodarka Materiałowa i Logistyka**www.gmil.pl**ZNAJDZIESZ NAS TU****www.gmil.pl****tel. 795 155 583****ul. Podwale 17****00-252 Warszawa**