

Koordynatorka: Wiktoria SOBCZYK

Piotr BURMISTRZ (5), Magdalena GAZDA-GRZYWACZ (5), Jerzy GÓRECKI (3), Przemysław GRZYWACZ (5), Monika MOTAK (4), Tadeusz OLKUSKI (1), Bogdan SAMOJEDEN (4), Eugeniusz Jacek SOBCZYK (1), Wiktoria SOBCZYK (1), Katarzyna STYSZKO (2), Katarzyna SZRAMOWIAT-SALA (3), Dominika UCHMANOWICZ (2)

V. Energetyka a środowisko

Abstrakt: W artykule przedstawiono sposoby produkcji energii zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju. Opisano realizację europejskiej polityki środowiskowej poprzez gospodarkę o obiegu zamkniętym. Podkreślono znaczenie dostępu do danych środowiskowych oraz nowoczesnych technik pomiarowych w analizach ilościowych i jakościowych. Wskazano korzyści płynące z zastosowania klasycznych metod oraz technik głębokiego i wzmacnianego uczenia do modelowania procesów energetycznych. Omówiono kwestię wykorzystania innowacyjnych materiałów katalitycznych i sorpcyjnych do oczyszczania gazów odlotowych oraz konwersji i zagospodarowania dwutlenku węgla. Wykazano znaczenie identyfikacji i kwantyfikacji punktów krytycznych w całym łańcuchu wartości paliwa. Przedstawiono znaczenie decyzji inwestycyjnych i regulacyjnych w procesie dekarbonizacji.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, dekarbonizacja, inteligentne systemy elektroenergetyczne, systemy monitorowania, prognozowanie produkcji i zużycia energii, uczenie maszynowe, analityka środowiskowa, kataliza SCR, konwersja CO₂

Największym zagrożeniem dla ludzkości są obecnie zmiany klimatu. Wzrost emisji do atmosfery gazów cieplarnianych, w tym CO₂, spowodowany spalaniem paliw kopalnych, deforestacją, niewłaściwą gospodarką terenami rolnymi i leśnymi czy osuszaniem bagien i mokradeł, prowadzi do globalnego ocieplenia, a w następstwie do zakwaszenia i zmiany składu chemicznego oceanów, zaniku bioróżnorodności oraz masowego wymierania gatunków roślin i zwierząt. W procesie dekarbonizacji gospodarki niezbędne jest systematyczne ograniczanie emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Przegląd wybranych wskaźników zrównoważonego rozwoju w technologii produkcji energii elektrycznej (współczynnik sprawności, koszt produkcji

energii elektrycznej, ekwiwalent dwutlenku węgla, gwarancja dostawy energii do odbiorcy) pokazuje, że indeks dekarbonizacji miksu energetycznego w Polsce dynamicznie wzrasta. Analiza etapów łańcucha paliwowego – od eksploatacji surowca, poprzez jego przetwórstwo, po wykorzystanie i recykling odpadów – pozwala wyróżnić poszczególne elementy procesu produkcji paliwa wpływające na całkowity ślad węglowy. Ogromnie ważną rolę w zwiększeniu zrównoważenia środowiskowego odgrywają wykorzystanie nowoczesnych technologii oczyszczania gazów odlotowych z elektrowni i spalarni (odsiarczanie, odazotowanie) oraz konwersja i zagospodarowanie dwutlenku węgla. Zaproponowane wydajne rozwiązania zmniejszają ogólny ślad węglowy w procesie produkcji energii.

Współczesne wyzwania związane z ochroną środowiska wymagają interdyscyplinarnego podejścia do identyfikacji źródeł zanieczyszczeń. Rozwój technik pomiarowych oraz dostęp do danych środowiskowych i przemysłowych otwierają nowe możliwości ograniczania emisji. Klasyczne metody (drzewa decyzyjne, SVM, MLP) oraz techniki głębokiego i wzmacnianego uczenia (CNN, PPO) służą do modelowania procesów energetycznych. Połączenie wiedzy inżynierskiej i uczenia maszynowego (ML) wspiera automatyzację, optymalizację i rozwój nowoczesnej analityki środowiskowej. Dzięki wdrożeniu nowych modeli identyfikacji stopnia narażenia na zanieczyszczenia zanotowano zwiększenie

świadomości społecznej i instytucjonalnej na temat zagrożeń środowiskowych. Zrównoważony rozwój energetyczny zaspokaja potrzeby współczesnego pokolenia bez szkody dla przyszłych generacji. Energia powinna być produkowana i dostarczana w sposób bezpieczny, efektywny i przyjazny dla środowiska, z uwzględnieniem potrzeb społecznych i gospodarczych. Dążenie do minimalizacji zużycia energii przy jednoczesnym zachowaniu komfortu i wydajności – to warunek niezbędny dla osiągnięcia neutralności klimatycznej.

1. Wskaźniki zrównoważonego rozwoju w technologii produkcji energii elektrycznej

6 lutego 2024 r. Komisja Europejska ogłosiła nowy cel redukcji emisji netto gazów cieplarnianych. Zakłada on ograniczenie do 2040 r. emisji CO₂ o 90% w porównaniu z rokiem 1990. Jest to etap pośredni, który ma umożliwić osiągnięcie stanu całkowitej neutralności klimatycznej do roku 2050 (Komisja Europejska 2021, Unia Europejska 2019). Przesłanki powyższe zmierzają do realizacji zrównoważonego rozwoju w zakresie produkcji energii elektrycznej. Wdrożenie tej koncepcji ma na celu ograniczenie poziomu wykorzystania zasobów naturalnych, redukcję emisji szkodliwych gazów oraz stosowanie zeroemisyjnych metod produkcji energii elektrycznej. Dowody naukowe wskazują na stopniowe ograniczanie wydobycia paliw kopalnych przeznaczonych do produkcji energii. Do analizy tempa dekarbonizacji przyjęto trzy wskaźniki zrównoważonego rozwoju w technologii produkcji energii elektrycznej: cena jednostkowa wytworzonej energii, ilość emitowanych gazów cieplarnianych oraz niezawodność (gwarancja) dostawy energii dla odbiorców (Niu et al. 2008).

1.1. Materiał i metody badań

Zespół Edukacja dla Zrównoważonego Rozwoju, tworzony przez pracowników naukowo-badawczych

polskich i zagranicznych instytucji naukowych (AGH w Krakowie, PAN Kraków, GIOŚ Kraków, Ukraina: Równe, UAN Kijów) i koncentrujący się na analizie realizacji celów zrównoważonego rozwoju w energetyce oraz roli edukacji ekologicznej społeczeństwa, postanowił ocenić postęp dekarbonizacji. W tym celu zaprojektowano wskaźnik poziomu neutralności emisyjnej i scharakteryzowano zmiany miksu energetycznego w Polsce na tle uśrednionych wartości w krajach Unii Europejskiej w latach 2000–2024. Do budowy wskaźnika zastosowano metodę analitycznego procesu hierarchicznego (*analytic hierarchy process*, AHP), która przebiega w następujących etapach: modelowanie problemu w postaci struktury hierarchicznej, szacowanie i agregacja współczynników wagowych (oceny eksperckie), kontrola spójności opinii ekspertów, konstrukcja indeksu dekarbonizacji I_D oraz ocena miksu energetycznego z wykorzystaniem indeksu I_D (Saaty 2004).

Oceny technologii wytwarzania energii elektrycznej wchodzących w skład miksu energetycznego dokonano za pomocą wskaźników reprezentujących następujące filary zrównoważonego rozwoju: techniczny, ekonomiczny, środowiskowy i społeczny. Wybrane kryteria posłużyły do budowy hierarchicznego modelu AHP, który pozwolił na ocenę wszystkich kryteriów w kontekście ich wpływu na zmniejszanie emisji gazów cieplarnianych w ekwiwalencie dwutlenku węgla (CO_{2e}). Ekwiwalent ten to uniwersalna jednostka miary, która służy do porównywania emisji różnych gazów cieplarnianych. Przy jej użyciu wyraża się wpływ tych gazów na ocieplenie globalne, a ich emisje zostają przeliczone na równoważną ilość dwutlenku węgla.

Oceny ważności elementów zostały wyrażone w postaci priorytetów (wag) wynikających z porównania parami kryteriów, z wykorzystaniem 9-stopniowej skali Saaty'ego. Z analizy zagregowanej wartości wyliczenia modelu wynika, że na proces dekarbonizacji zdecydowanie największy wpływ ma filar środowiskowy, reprezentowany przez wielkość emisji CO_{2e} – 0,55. Relatywnie wysoką wagę uzyskał filar ekonomiczny, wyrażony przez koszt produkcji energii elektrycznej (LCOE) – 0,23. Filary technologiczny i społeczny mają wagi odpowiednio: 0,14 i 0,09.

Wagi wykorzystano do budowy indeksu dekarbonizacji I_D , który posłużył do oceny zmiany miksu energetycznego w Polsce i w krajach Unii Europejskiej. Współczynnik sprawności (%) zdefiniowany jest jako stosunek energii uzyskanej do energii pobranej. Koszt produkcji energii elektrycznej obliczono na podstawie parametru LCOE (*levelized cost of electricity*), uwzględniającego wszystkie koszty wytwarzania energii w całym cyklu życia elektrowni. Obrazuje on koszt wytworzenia jednostki energii w okresie eksploatacji danego źródła, z uwzględnieniem kosztów budowy oraz kosztów operacyjnych i demontażu. Jest to kluczowy wskaźnik do porównywania opłacalności różnych źródeł energii. Ekwiwalent dwutlenku węgla (CO_{2e}) jest jednostką miary wyrażającą wpływ gazów szklarniowych na globalne ocieplenie. Gwarancja dostawy energii do odbiorcy oznacza pełną możliwość wytwarzania energii w określonym czasie (Afgan et Carvalho 2002, Dipto et al. 2020, Shaaban et al. 2018). Elektrownie wodne mają najwyższy współczynnik sprawności (90%) spośród wszystkich źródeł, a energia słoneczna najniższy (22%). Węgiel ma wyższy współczynnik sprawności (40%) niż energia jądrowa (33%) i ropa naftowa (38%), i nieco niższy niż gaz (44%) (Edenhofer et al. 2014). Elektrownie węglowe są źródłem największej emisji CO_{2e} : 820 kg CO_{2e} /kWh. Odnawialne źródła energii oraz elektrownie jądrowe mają niemal zerową emisję (12 kg CO_{2e} /kWh).

Do konstrukcji indeksu dekarbonizacji I_D wykorzystano miarę agregatową, która powstaje z połączenia

w jednej formule przyjętych zasad normalizacji, ważenia i agregacji zmiennych:

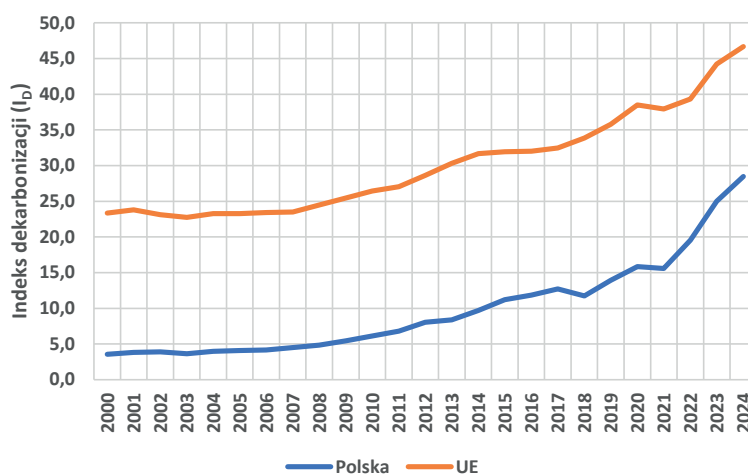
$$I_D = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot z_{ij}$$

gdzie: I_D – wartość indeksu dekarbonizacji, j – numer cechy statystycznej, m – liczba cech statystycznych, α_j – waga j -tej cechy statystycznej, z_{ij} – wartości cech po normalizacji.

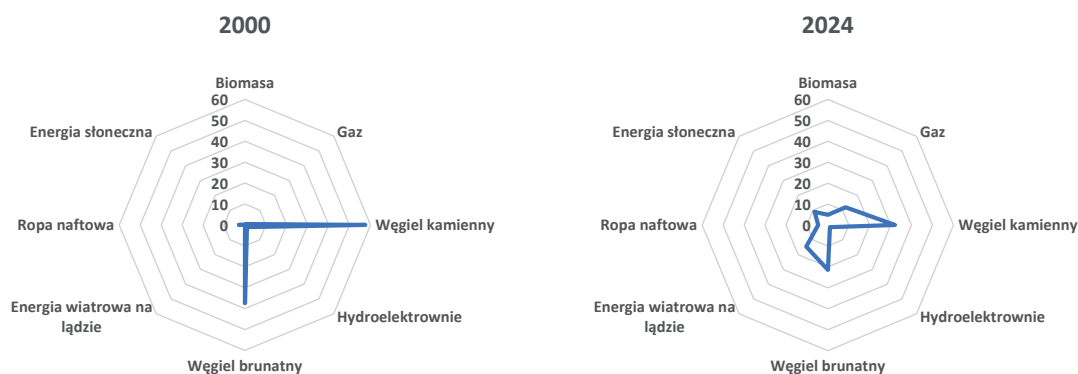
Cechy statystyczne wykorzystywane przy konstrukcji wskaźników agregatowych są mianowane, to też aby sumować przekształcone wartości cech, mian należało się pozbyć. W analizie zastosowano metodę unitaryzacji, dzięki której zarówno przekształcone wartości cech, jak i wartości wskaźnika agregatowego przyjmują wartości z przedziału 0–1.

Sumaryczna wartość indeksów dekarbonizacji (I_D) poszczególnych technologii wchodzących w skład miksu energetycznego pokazuje tempo zmian procesu dekarbonizacyjnego w Polsce na tle uśrednionych wartości w krajach Unii Europejskiej w okresie 2000–2024 (Rys. 1).

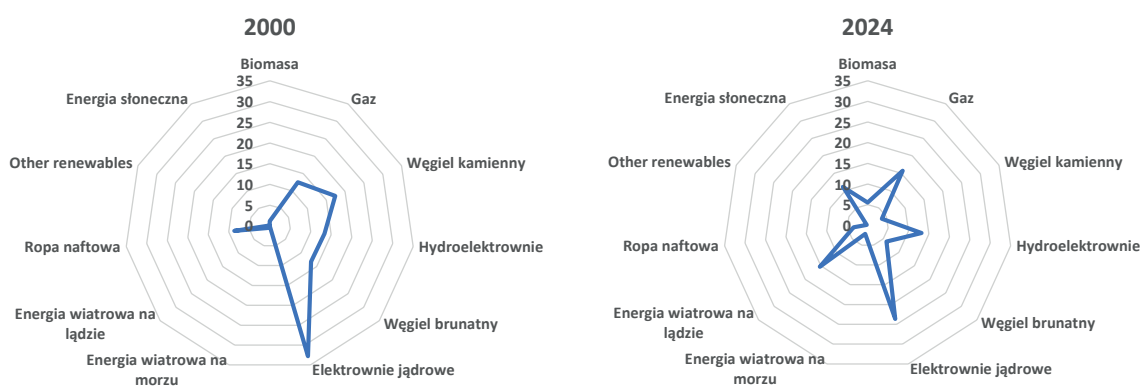
W Polsce w 2000 r. sumaryczna wartość indeksu dekarbonizacji I_D miksu energetycznego wynosiła 3,5. Tak niski poziom wynikał z 95-procentowego udziału paliw kopalnych w wytwarzaniu energii (Rys. 2). W niewielkim stopniu miks energetyczny uzupełniały elektrownie wodne, gazowe oraz ropa naftowa. Dynamiczny wzrost I_D obserwowano w latach 2010–2024.



Rys. 1. Trend zmian indeksu dekarbonizacji (I_D) w Polsce i UE w latach 2000–2024



Rys. 2. Struktura źródeł produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2000 i 2024 (Eurostat 2025)



Rys. 3. Struktura produkcji energii elektrycznej w krajach UE w 2000 i 2024 (Eurostat 2025)

Indeks dekarbonizacji w krajach UE jest zdecydowanie wyższy niż w Polsce. W 2000 r. wartość I_D wynosiła tam 23,3. Wpływ na to miał bardzo duży udział wytwarzania energii z elektrowni jądrowych (32,8%) oraz z elektrowni wodnych (13,4%). Udział paliw węglowych oceniono na 30,5% (Rys. 3).

1.2. Podsumowanie

Dekarbonizacja polskiej gospodarki jest szczególnie trudnym przedsięwzięciem ze względu na zależność od paliw kopalnych, w tym przede wszystkim węgla. Właściwa Polityka energetyczna polski (PEP2040) doprowadziła do wzrostu wartości indeksu dekarbonizacji I_D w 2024 r. do 28,5. Wynika to z faktu zmniejszenia udziału źródeł węglowych w miksie energetycznym, które w roku 2024 odpowiadały już tylko za 53,5% produkcji energii elektrycznej. W krajach

UE od 2011 r. obserwuje się dynamiczny wzrost I_D . W latach 2011–2024 indeks I_D wzrósł o 20,2, osiągając w 2024 r. maksymalną wartość 46,7. Wynika to ze zmniejszenia udziału źródeł węglowych w miksie energetycznym do poziomu 9,8%. W 2024 r. odnawialne źródła energii odpowiadały za 48% produkcji energii elektrycznej w całkowitym wytwarzaniu energii. Należy zauważyć zmniejszenie do 23,6% udziału wytwarzania energii z elektrowni jądrowych.

2. Mikrozanieczyszczenia i ocena ryzyka środowiskowego w aspekcie gospodarki cyrkularnej

Współczesne wyzwania związane z ochroną środowiska wymagają zintegrowanego i interdyscyplinarnego podejścia do identyfikacji oraz ograniczania źródeł

zanieczyszczeń, których obecność w środowisku jest trudna do przewidzenia i jeszcze trudniejsza do kontrolowania. Szczególnie niepokojącą grupę substancji stanowią tzw. mikrozanieczyszczenia, czyli związki chemiczne występujące w środowisku w bardzo małych stężeniach (rzędu od nanogramów do mikrogramów na litr), które wykazują silne działanie biologiczne. Należą do nich m.in. mikroplastiki, pozostałości farmaceutyków, środków ochrony osobistej, kosmetyków czy substancji endokrynnie czynnych, a także związki psychoaktywne. Ich źródłem są głównie gospodarstwa domowe, placówki medyczne i przemysł, a ich droga do środowiska wiedzie zazwyczaj przez systemy kanalizacyjne i oczyszczalnie ścieków, jak pokazano na Rys. 4.



Rys. 4. Źródła i drogi emisji mikrozanieczyszczeń w środowisku miejskim oraz ich wpływ na jakość wód i powietrza

2.1. Profil badawczy

Zespół Badań Współczesnych Zagrożeń Środowiska i Rozwoju Innowacyjnych Technologii w Gospodarce Obiegu Zamkniętego, który działa od 2019 r., zajmuje się emisją i mikrozanieczyszczeniami w dwóch obszarach: środowiska wodnego i powietrza. Profil badawczy zespołu obejmuje rozwój i zastosowanie procedur analitycznych z wykorzystaniem najnowszych technik pomiarowych niezbędnych do właściwej oceny ryzyka środowiskowego wprowadzanych nowych produktów i rozwiązań technologicznych, identyfikacji nowych zanieczyszczeń i markerów procesów zachodzących z ich udziałem.

W obszarze zainteresowań zespołu znajduje się również rozwój i zastosowanie innowacyjnej metody epidemiologicznej z wykorzystaniem analizy ścieków (*wastewater-based epidemiology*, WBE) do oceny narażenia populacji na terenach zurbanizowanych na zanieczyszczenie środowiska. Ponadto zespół prowadzi badania nad zmiennością sezonową źródeł zanieczyszczeń pyłowych powietrza na terenach zurbanizowanych wraz z identyfikacją zmian profilu źródeł zanieczyszczeń w aspekcie zmian w branży paliwowej i energetycznej oraz dokonuje analizy wpływu na środowisko i zdrowie człowieka z wykorzystaniem modeli transportu zanieczyszczeń i algorytmów uczenia maszynowego.

2.2. Prace badawcze i współpraca

Zespół realizuje prace badawcze w ramach projektów NCN, IDUB, grantów europejskich, we współpracy z partnerami krajowymi (Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet Gdański, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach), zagranicznymi (University of Bath, Vienna University of Technology, Paul Sherrer Institute, Mario Negri Institute, UTAD) oraz m.in. w ramach międzynarodowej grupy badawczej SCORE i sieci ACTRIS. Lider zespołu jest autorem innowacyjnego i pierwszego na świecie podejścia do oceny stopnia narażenia populacji na WWA z wykorzystaniem WBE, którego opracowanie jest realizowane w ramach projektu NCN (González-Mariño 2020, Pamuła et al. 2025, Styszko et al. 2021, 2025). Istotnym podejmowanym przez grupę tematem jest ocena możliwości stosowania osadów ściekowych do produkcji nawozów mineralno-organicznych w aspekcie zagrożenia emisji do środowiska mikrozanieczyszczeń, w tym mikroplastiku (Frydel et al. 2025, Styszko et al. 2025a, 2025b, Worek et al. 2025, Worek et al. 2025). Zespół ma również wieloletnie doświadczenie w zakresie badań aerozoli atmosferycznych, co pozwoliło na utworzenie specjalistycznej stacji badawczej w ramach projektu RI-URBANS (Furman et al. 2021, Konduracka et al. 2022, Samek et al. 2020, Skiba et al. 2024a, 2024b, Casotto et al. 2023, Zimnoch et al. 2020). Prowadzone

są analizy sorpcji mikrozanieczyszczeń oceniające ich mobilność i potencjał akumulacji (Furman et al. 2021, Samek et al. 2020 Zimnoch et al. 2020). Badano również właściwości adsorpcyjne nowatorskich materiałów, w tym fotokatalizatorów z tlenkiem tytanu, pod kątem skuteczności usuwania biologicznie aktywnych związków.

W pracach zespołu wykorzystuje się liczne zaawansowane metody analityczne obejmujące m.in. wysokosprawną chromatografię cieczową i gazową sprzężone z spektrometrią mas (LC-MS/MS, GC-MS), umożliwiające oznaczanie mikrozanieczyszczeń w wodach powierzchniowych, ściekach, osadach oraz powietrzu. Szczególną uwagę poświęcono związkom aktywnym biologicznie, takim jak pozostałości farmaceutyków, substancje endokrynnie i psychoaktywne oraz metabolity. W badaniach aerozoli atmosferycznych stosujemy m.in. chromatografię jonową z detektorem konduktometrycznym oraz system specjacji frakcji węglowej (TCA-08 + aethalometr AE-33), który w sposób ciągły mierzy stężenie węgla organicznego i nieorganicznego w aerozolu w powietrzu atmosferycznym.

2.3. Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań potwierdzają powszechną obecność mikrozanieczyszczeń w środowisku zurbanizowanym. W ściekach wykryto m.in. metabolity leków przeciwbólowych, przeciwdepresyjnych, antybiotyków oraz stymulanty, takie jak kofeina i amfetamina, co potwierdza ich stałe wprowadzanie do środowiska. Analiza danych w układzie przestrzennym i czasowym pozwoliła ocenić skuteczność lokalnych systemów kanalizacyjnych i oczyszczalni oraz sformułować rekomendacje dotyczące polityki środowiskowej. Również analizy jakości powietrza wykazały w badanych frakcjach pyłów znaczący udział związków toksycznych, istotnych z punktu widzenia zdrowia publicznego i wpływu na jakość powietrza. Na podstawie analiz frakcji pyłu zawieszonego PM₁₀, modeli transportu zanieczyszczeń oraz algorytmów uczenia maszynowego opracowano nowe modele identyfikacji stopnia

narażenia społeczności na wybrane zanieczyszczenia powietrza. Co istotne, badania te przyczyniły się do zwiększenia świadomości społecznej i instytucjonalnej na temat zagrożeń związanych z mikrozanieczyszczeniami w środowisku miejskim.

3. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego w analityce przemysłowej i środowiskowej

Współczesne wyzwania związane z ochroną środowiska oraz transformacją energetyczną wymagają nowoczesnych metod analizy i interpretacji danych, które pochodzą zarówno z rzeczywistych procesów przemysłowych, jak i z badań laboratoryjnych. Jednak dane pozyskiwane z laboratoryjnych lub przemysłowych stanowisk badawczych są często bardzo złożone, wielowymiarowe i trudne do jednoznacznej interpretacji przy użyciu klasycznych metod statystycznych. W związku z powyższym coraz większe znaczenie zyskują nowoczesne metody interpretacji danych, takie jak uczenie maszynowe (ML), które umożliwiają identyfikację ukrytych zależności, klasyfikację źródeł emisji, wykrywanie anomalii oraz predykcję przebiegu zjawisk. Integracja wiedzy eksperymentalnej z algorytmami ML pozwala nie tylko na lepsze zrozumienie badanych procesów, ale także na projektowanie inteligentnych systemów wspomagania decyzji oraz automatyzację analizy danych w czasie rzeczywistym.

3.1. Praktyczna analiza sygnałów procesowych – podejście eksperymentalne

Wykorzystanie układów pomiarowych (laboratoryjnych i przemysłowych) jako wiarygodnego źródła danych dla metod ML wymaga dużej wiedzy analitycznej i znajomości wymagań metod ML. W ciągu ostatnich kilku lat w Zespole Analityki Przemysłowej i Środowiskowej oraz Przetwarzania Danych powstało wiele

układów pomiarowych, których głównym celem było ograniczenie negatywnego wpływu energetyki na środowisko lub ocena skutków środowiskowych emisji zanieczyszczeń. W ramach projektu Unii Europejskiej CoalGas skonstruowano mobilny układ do badania specjacji rtęci w spalinach (Górecki et al. 2016). Ponadto opracowano układ do pomiarów stężenia rtęci w gazie koksowniczym. Było to pierwsze tego typu oznaczenie na świecie (Górecki et al. 2018). W zespole podejmowano również tematykę oceny wpływu sektora energetycznego na wybrane komponenty środowiska. Przykładem laboratoryjnej konstrukcji służącej badaniom związanym z ograniczeniem emisji jest wibracyjny układ do testów sorbentów (Górecki et al. 2024) powstały we współpracy z Centrum Energetyki Technicznego Uniwersytetu w Ostrawie. Doświadczenia zebrane w trakcie konstruowania powyższych oraz innych układów pomiarowych pozwalają na zastosowanie posiadanej wiedzy do tworzenia systemów będących źródłem danych dla metod uczenia maszynowego, które pozwalają na określanie złożonych zależności, np. pomiędzy składnikami spalin. Obecnie zespół pracuje nad projektem „Badania nad wykorzystaniem głębokiego uczenia do analizy uwalnianych mikrozanieczyszczeń wraz z gazami wylotowymi w procesie termochemicznej transformacji surowców energetycznych”. Celem prac jest zaprojektowanie algorytmów głębokiego uczenia do analizy i predykcji uwalniania lotnych związków organicznych (LZO) w zależności od warunków przebiegu procesu transformacji termochemicznej.

3.2. Modelowanie i predykcja – integracja danych pomiarowych i ML

Integracja danych eksperymentalnych z algorytmami uczenia maszynowego umożliwia budowę systemów predykcyjnych wspierających decyzje inżynierskie i operacyjne. W celu analizy zależności pomiędzy wskaźnikami emisji zanieczyszczeń atmosferycznych a parametrami pracy automatycznego kotła zastosowano sztuczne sieci neuronowe. Badania te wykazały wysoki potencjał metod inteligencji obliczeniowej

w modelowaniu złożonych, wielokryterialnych zależności w technologicznych procesach energetycznych (Szramowiat-Sala et al. 2024). Innym zastosowaniem inteligencji obliczeniowej jest optymalizacja i maksymalizacja procesu wzrostu alg z wykorzystaniem uczenia ze wzmocnieniem. Porównując przebieg doświadczeń z RL (*reinforcement learning* – technika uczenia maszynowego, która uczy oprogramowanie podejmowania decyzji w celu osiągnięcia optymalnych rezultatów) i bez RL, wykazano ponad pięciokrotny wzrost mętności i znaczący wzrost przewidywanego pochłaniania CO₂ i produkcji biooleju. Warto jednak podkreślić, że *data science* obejmuje znacznie szerszy zakres metod niż tylko techniki bazujące na sztucznej inteligencji. Skuteczne są również podejścia klasyczne, takie jak modele regresyjne, uczenie statystyczne czy analizy receptorowe. Przykładowo w pracy (Szramowiat-Sala et al. 2025) wykorzystano współczynniki korelacji rang Spearmana oraz wskaźniki diagnostyczne do interpretacji danych dotyczących zanieczyszczenia powietrza wielopierścienowymi węglowodorami aromatycznymi w Krakowie. W badaniach tych zastosowano analizę trajektorii wstecznych mas powietrza w celu identyfikacji potencjalnych źródeł emisji, integrując perspektywę statystyczną z narzędziami środowiskowego modelowania przestrzennego.

Podobne podejście może być stosowane wobec innych procesów środowiskowych, np. przy przewidywaniu emisji w reaktorach spalania lub zachowań układów sorpcyjnych. Systemy takie mogą działać w czasie rzeczywistym, wspomagając pracę laboratorium lub instalacji pilotażowych, a docelowo także układów przemysłowych. Kluczowe jest, aby takie modele były nie tylko dokładne, ale również interpretowalne. Efektywne zastosowanie metod uczenia maszynowego w analizie danych pochodzących z eksperymentalnych stanowisk badawczych wymaga systematycznego podejścia obejmującego kilka kluczowych etapów. Każdy z nich wpływa na jakość końcowej analizy, wiarygodność wyników i możliwość praktycznego wykorzystania uzyskanych modeli predykcyjnych.

3.3. Wnioski

Uczenie maszynowe staje się istotnym narzędziem w analizie danych z eksperymentalnych stanowisk przemysłowych i środowiskowych. Integracja interpretowalnych modeli ML z wiedzą inżynierską umożliwia identyfikację zależności w złożonych procesach, takich jak emisje zanieczyszczeń, wzrost mikroorganizmów czy spalanie paliw. Przedstawione przykłady – od klasyfikatorów po głębokie sieci i algorytmy RL – pokazują, że wykorzystanie danych pomiarowych w połączeniu z ML wspiera automatyzację analizy, predykcję i optymalizację procesów. Rozwój tego podejścia wymaga współpracy interdyscyplinarnej i dalszych badań nad uogólnianiem modeli, ich testowaniem w różnych warunkach oraz rozszerzaniem analiz o kolejne aspekty środowiskowe.

4. Nowe materiały i technologie katalityczne dla redukcji emisji oraz chemicznego zagospodarowania ditlenku węgla

Energetyka XXI wieku stoi przed wyzwaniami związanymi z rosnącym zapotrzebowaniem na energię przy jednoczesnej konieczności ograniczenia emisji szkodliwych związków do środowiska. Działalność Zespołu Procesów Katalitycznych i Adsorpcyjnych w Energetyce i Ochronie Środowiska odpowiada na te potrzeby, koncentrując się na opracowywaniu nowych materiałów do oczyszczania spalin oraz konwersji dwutlenku węgla, jednego z głównych gazów cieplarnianych. Badania prowadzone przez zespół mają charakter interdyscyplinarny i łączą kompetencje z zakresu chemii, technologii chemicznej, inżynierii procesowej i ochrony środowiska.

4.1. Selektywna redukcja katalityczna (SCR)

Proces selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) z wykorzystaniem amoniaku jest obecnie najczęściej stosowaną metodą usuwania tlenków azotu z gazów

odlotowych w energetyce zawodowej i przemyśle chemicznym. Tradycyjne katalizatory oparte na tlenkach wanadu i tytanu wykazują wysoką skuteczność, lecz posiadają liczne ograniczenia, takie jak toksyczność, niekorzystne okno temperaturowe, wysoka cena oraz problemy z utylizacją zużytego materiału. Działania zespołu koncentrują się na poszukiwaniu alternatywnych, ekologicznych materiałów wykazujących wysoką aktywność, selektywność i stabilność katalityczną w niższym zakresie temperatur niż obecnie stosowany. Badania obejmują funkcjonalizowanie materiałów takich jak: węgle aktywne, naturalne i syntetyczne zeolity, glinokrzemiany warstwowe, hydrotalkit. Modyfikacje chemiczne tych materiałów, między innymi kwasem azotowym oraz jonami metali przejściowych, prowadzą do uzyskania układów o wysokiej powierzchni aktywnej, korzystnej kwasowości oraz dobrych właściwościach redoks. Szczególne znaczenie mają badania nad wpływem obecności trucizn centrów katalitycznych, takich jak ditlenek siarki (SO_2) i para wodna (H_2O), na aktywność i stabilność pracy katalizatorów. Zespół wykazał, że odpowiednio zaprojektowane materiały, bazujące na węglach funkcjonalizowanych z niską zawartością metalu aktywnego, zachowują wysoką selektywność do azotu nawet po długim czasie ekspozycji na warunki reakcji. W badaniach wykazano również, że regeneracja termiczna pozwala na odzyskanie znacznej części pierwotnej aktywności katalizatora. Badania nad kolejną grupą materiałów naturalnych także wykazały ich potencjał aplikacyjny w reakcji SCR. Opracowany w zespole katalizator na bazie klinoptylolitu modyfikowanego żelazem został wdrożony do testów przemysłowych w instalacji do produkcji kwasu azotowego(V). Prace te zaowocowały patentem i wzmocnieniem współpracy z przemysłem chemicznym.

4.2. Konwersja CO_2 i magazynowanie energii

W odpowiedzi na wyzwania klimatyczne i konieczność redukcji emisji CO_2 zespół prowadzi prace nad technologiami CCU, czyli zagospodarowaniem CO_2 jako surowca chemicznego. Dwa podstawowe procesy badane przez zespół to metanizacja CO_2 z wykorzystaniem

wodoru otrzymanego w procesie elektrolizy wody oraz suchy reforming metanu (DRM), w którym CO_2 reaguje z metanem CH_4 , dając gaz syntezowy. Oba procesy mogą być wykorzystane jako forma chemicznego magazynowania nadwyżek energii, na przykład z odnawialnych źródeł. Zespół opracował szereg katalizatorów opartych na metalach przejściowych, takich jak nikiel czy kobalt, osadzonych na materiałach warstwowych, zeolitowych i wermikulicie. Badania dowiodły, że możliwe jest prowadzenie reakcji w warunkach niskotemperaturowych z zachowaniem wysokiej selektywności produktowej. W szczególności w pracach nad DRM wykazano możliwość wykorzystania biogazu, będącego mieszaniną CO_2 i CH_4 , jako substratu, co dodatkowo zwiększa środowiskową efektywność procesu. Zespół zbadał wpływ stosunku substratów, rodzaju nośnika, metalu aktywnego i promotora, a także temperatury i czasu kontaktu na aktywność i selektywność reakcji. Opracowane układy katalityczne wykazały również dobrą stabilność termiczną i odporność na zatrucie parą wodną.

4.3. Kataliza plazmowa

Zespół aktywnie uczestniczył w międzynarodowym grancie PIONEER, w ramach którego realizowano badania nad katalityczną konwersją CO_2 wspomaganą plazmą. Zastosowanie plazmy, w tym plazmy DBD i mikrofalowej, pozwala na obniżenie temperatury reakcji oraz zwiększenie aktywacji substratów gazowych. Zespół opracował nowe katalizatory plazmowe we współpracy z Uniwersytetem w Trydencie oraz CNRS w Caen. Testy prowadzono z wykorzystaniem zaawansowanych metod spektroskopowych i analiz reakcji przepływowych. W badaniach prowadzonych w ramach PIONEER zastosowano interdyscyplinarne podejście łączące wiedzę z zakresu inżynierii reakcji chemicznych, fizyki plazmy oraz spektroskopii operando. Umożliwiło to pełniejszą analizę mechanizmów reakcyjnych oraz identyfikację aktywnych centrów katalitycznych powstających pod wpływem działania plazmy. Zespół zidentyfikował warunki prowadzenia reakcji DRM i metanizacji CO_2 , które umożliwiają

wysoką konwersję substratów przy minimalnym zużyciu energii elektrycznej generującej plazmę.

4.4. Materiały sorpcyjne i oczyszczanie środowiska

Od początku działalności zespół prowadził badania nad nanokompozytami mineralno-węglowymi na bazie montmorillonitu i materiałów węglowych, wykorzystywanymi do sorpcji gazów i par. Rozwinięto także skuteczne badania sorpcji metali ciężkich oraz związków organicznych ze ścieków przemysłowych. Współpraca z oczyszczalnią ścieków pozwoliła na wdrożenie opracowanych materiałów w warunkach rzeczywistych. W zakresie oczyszczania ścieków zespół badał skuteczność sorpcji względem jonów metali ciężkich (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+}), związków fosforu i azotu, fenolu oraz zanieczyszczeń specyficznych dla przemysłu chemicznego. Wyniki wykazały, że odpowiednio zmodyfikowane materiały glinokrzemianowe, w tym organomontmorillonity, wykazują efektywność przewyższającą standardowo stosowane metody chemicznego strącania. Zespół zajmował się także konwersją odpadów chemicznych. Badano katalityczne odwodnienie metanolu do eteru dimetylowego jako paliwa alternatywnego oraz dehydratację gliceryny odpadowej do akroleiny. Wyniki badań wykazały wysoką selektywność uzyskanych katalizatorów oraz ich odporność na deaktywację.

4.5. Zespół i współpraca naukowa

Zespół Procesów Katalitycznych i Adsorpcyjnych w Energetyce i Ochronie Środowiska zrzesza pracowników naukowych, doktorantów oraz studentów Wydziału Energetyki i Paliw. W ramach działalności zespołu zrealizowano kilkanaście przewodów doktorskich, z czego siedem pod bezpośrednim kierunkiem lidera zespołu. Zespół aktywnie współpracuje z ośrodkami naukowymi na całym świecie, m.in. z Sorboną, Politechniką w Walencji, Uniwersytetem w Lipsku, Uniwersytetem w Trydencie i Uniwersytetem w Trondheim, a także z polskimi instytucjami, takimi jak Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza oraz

Politechnika Łódzka. Członkowie zespołu uczestniczą w projektach realizowanych w ramach programów Horyzont Europa, Erasmus+, IDUB, NCN oraz NCBR, a także należą do Polskiego Klubu Katalizy i Polskiego Towarzystwa Chemicznego. Ponadto koordynują prace grantu dydaktycznego I-MAT, który łączy ośrodki naukowe z Peru, Kolumbii, Brazylii, Litwy i Portugalii. Celem projektu jest wspieranie mobilności pracowników i studentów między Ameryką Południową a Europą.

4.6. Podsumowanie

Działalność Zespołu Procesów Katalitycznych i Adsorpcyjnych w Energetyce i Ochronie Środowiska wpisuje się w aktualne potrzeby transformacji energetycznej oraz zrównoważonego rozwoju. Opracowane rozwiązania w zakresie katalizy, adsorpcji, konwersji CO₂ oraz oczyszczania gazów i ścieków wykazują wysoką efektywność i gotowość do wdrożeń przemysłowych. Zespół łączy wysoką jakość badań podstawowych z praktycznymi wdrożeniami i szeroką współpracą międzynarodową. Dzięki interdyscyplinarnemu podejściu i ścisłej współpracy z przemysłem jednostka odgrywa istotną rolę w kształtowaniu badań innowacyjnej energetyki i nowoczesnych trendów badawczych.

5. Analiza środowiskowa technologii paliwowych

Analizy środowiskowe w sektorze paliwowo-energetycznym obejmują szeroki zestaw narzędzi – od klasycznych ocen w raportach oddziaływania na środowisko (*environmental impact assessment*, EIA) (Woźniak et al. 2025), przez kompleksowe studia BAT (Komisja Europejska b.r.b) określone dyrektywą IED (Government UK 2016), aż po wielokryterialne analizy cyklu życia (*life cycle assessment*, LCA) (Komisja Europejska b.r.c). Ich wspólnym celem jest identyfikacja i kwantyfikacja punktów krytycznych (tzw. hot-spotów) w całym łańcuchu wartości paliwa, w celu minimalizacji emisji gazów cieplarnianych, zużycia wody, energii i surowców. W realizowanej dekarbonizacji takie analizy stanowią

podstawę zarówno decyzji inwestycyjnych, jak i procesów regulacyjnych (EU ETS, taksonomia zrównoważonych finansów, mechanizm CBAM) (Ecochain 2024).

Na tle tych metod ślad węglowy (*carbon footprint*, CF) (Komisja Europejska b.r.a) wyróżnia się precyzyjnym skupieniem na jednej, aktualnie bardzo istotnej kategorii – oddziaływaniu na zmiany klimatu. Stanowi tym samym uniwersalny wskaźnik w komunikacji między przemysłem, administracją i instytucjami finansowymi. Włączenie CF do analizy technologii paliwowych pozwala ocenić, które rozwiązania faktycznie przybliżają sektor do neutralności klimatycznej, a które jedynie przesuwają emisje w inne ogniwa łańcucha. CF stał się w ostatniej dekadzie kluczowym wskaźnikiem środowiskowym dla branży paliwowej. Umożliwia on ilościowe porównanie całkowitych emisji gazów cieplarnianych (GHG) – bezpośrednich i pośrednich – we wszystkich ogniwach łańcucha wartości paliwa, od pozyskania surowca, przez jego przetwarzanie, po użytkowanie końcowe i utylizację – wyrażonych jako ekwiwalent CO₂. Metodologicznie CF jest elementem klasycznej oceny LCA, skupiającym się wyłącznie na kategorii *global warming potential*, przy zachowaniu wymagań ISO 14040/44 oraz 14067 (Burmistrz et al. 2016a, ISO/TR 14047 2012). CF stał się kluczowym elementem polityki klimatycznej UE, gdyż:

- pozwala na realizację strategii klimatycznej i taksonomii UE – redukcja emisji w energetyce i transporcie to główne filary pakietu „Fit for 55”; CF stanowi wspólny język raportowania dla przedsiębiorstw ubiegających się o finansowanie zrównoważonych inwestycji;
- umożliwia porównywalność technologii – na jednolitej jednostce funkcjonalnej (np. 1 GJ paliwa) można obiektywnie zestawić wodór „szary”, „niebieski” czy „zielony”, a także biopaliwa, paliwa syntetyczne i paliwa kopalne wspomagane technologiami CCS, CCU;
- stanowi wskaźnik decyzyjny dla polityk publicznych – wyniki CF są wykorzystywane przy ustalaniu poziomów aktywności klimatycznej, mechanizmów podatków węglowych i w systemach etykiet środowiskowych.

W artykule przedstawiono w sposób syntetyczny porównanie trzech technologii paliwowych w aspekcie analizy śladu węglowego.

5.1. Charakterystyka przypadków badawczych

Problem badawczy, który łączy prezentowane technologie, wynika z braku spójnej, ilościowej wiedzy o tym, jaka jest wielkość emisji gazów cieplarnianych. Zdecydowano o analizie porównawczej, gdzie rozpatrzono trzy komplementarne technologie paliwowe:

- zgazowanie węgla do wodoru (z wychwytem i sekwestracją CO₂ oraz bez nich) – zgazowano węgiel energetyczny (SBC) i brunatny (L) w reaktorach (Shell, GE/Texaco); rozważano dwa scenariusze: odzysk CO₂ bez sekwestracji oraz odzysk + sprężanie oraz zatłaczanie do struktur geologicznych (ISO 14040 2006);
- sorpcyjne usuwanie rtęci ze spalin przy użyciu pylistego węgla aktywnego (PAC) oraz pyłu koksowego (CD) – porównano oba sorbenty w cyklu „kopalnia-produkcja sorbentu-transport-aplikacja sorbentu do spalin-separacja” (Burmistrz et al. 2016b);
- wykorzystanie wodoru odzyskanego z gazu koksowniczego (COG) w autobusach z ogniwami paliwowymi – ocena WTW uwzględniała odzysk i oczyszczenie H₂ z gazu koksowniczego, kompresję, dystrybucję oraz etapy produkcji i eksploatacji autobusów (Gazda-Grzywacz 2021).

Każde z tych rozwiązań dotyczy innego etapu korzystania z paliw kopalnych, a razem tworzą spójny plan przejścia od gospodarki bazującej na węglu do gospodarki niskoemisyjnej.

5.2. Wyniki

Analizy cyklu życia (LCA) trzech technologii – sorpcyjnego usuwania rtęci, zgazowania węgla do wodoru oraz zastosowania wodoru z gazu koksowniczego w transporcie – opisują, jak poszczególne etapy łańcucha paliwowego wpływają na całkowity ślad węglowy

i które elementy procesu mają decydujące znaczenie dla jego ograniczenia. Eliminacja 1 kg Hg za pomocą pylistego węgla aktywnego (PAC) wiąże się z emisją 89,5 Mg CO₂-eq, natomiast wykorzystanie pyłu koksowego (CD) obniża ten wskaźnik do 24,5 Mg CO₂-eq. Głównym źródłem emisji w wariancie PAC pozostaje energochłonna produkcja sorbentu; w przypadku CD największy udział mają działania górnicze. Modele wskazują, że odzysk metanu z szybów wentylacyjnych lub efektywniejsze spalanie gazu pirolitycznego powstałego przy produkcji PAC może zmniejszyć całkowity ślad procesu o 44%.

Wytworzenie 1 GJ wodoru w technologii Shell przy włączeniu CCS generuje 34,5 kg CO₂-eq (43,4 kg w wariancie GE/Texaco); rezygnacja z sekwestracji podnosi emisje odpowiednio do 161,9 kg i 181,0 kg CO₂-eq. Dla lignitu wartości te wynoszą 59,5 kg CO₂-eq z CCS oraz ponad 210 kg CO₂-eq bez CCS. Integracja CCS ogranicza emisje o 69–78%, lecz przesuwa ich ciężar z bezpośredniej emisji z reaktora na emisję pośrednią związaną z energią zużywaną na sprężanie i zatłaczanie CO₂, która stanowi 60–74% całkowitego śladu węglowego.

W pełnym cyklu życia pojazd wodorowy (FCEVB) odpowiada jedynie za 29,9% globalnego ocieplenia wywoływanego przez autobus dieslowski i za 8,6% jego wpływu na niszczenie ozonu. Jednocześnie w większości kategorii LCA wypada lepiej niż autobus elektryczny (EVB), choć zużywa więcej surowców nieodnawialnych z powodu materiałochłonnej produkcji ogniw paliwowych. W fazie wytworzenia paliwa (*well-to-tank*) udział wodoru z gazu koksowniczego w żadnej kategorii nie przekracza 20% poziomu odniesienia, co czyni go najkorzystniejszym paliwem w zestawieniu.

5.3. Wnioski

Najistotniejsze czynniki decydujące o ilości śladu węglowego to: energochłonna produkcja PAC, zużycie energii elektrycznej do sprężania CO₂ w łańcuchu CCS oraz materiałochłonna budowa autobusów FCEV. Zastąpienie PAC odpadowym pyłem koksowym, dekarbonizacja energii pomocniczej w instalacjach CCS

oraz projektowanie lżejszych konstrukcji pojazdów pozwalają na znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Skuteczność środowiskowa analizowanych technologii zależy w dużym stopniu od warunków systemowych, przede wszystkim od emisyjności krajowego mixu elektroenergetycznego i dostępności strumieni odpadowych. Tylko równoczesna optymalizacja surowców, zużycia energii i wychwytu CO₂ pozwala uzyskać trwałą redukcję śladu węglowego w całym łańcuchu paliwowym.

6. Podsumowanie

Dekarbonizacja polskiej gospodarki jest szczególnie trudnym przedsięwzięciem ze względu na zależność od paliw kopalnych, w tym przede wszystkim węgla. Wpływ technologii paliwowych na środowisko zależy od emisyjności krajowego mixu elektroenergetycznego. Właściwa polityka energetyczna Polski doprowadziła do wzrostu wartości indeksu dekarbonizacji I_D w 2024 r. do 28,5. Z przedstawionych badań wynika, że optymalizacja zużycia energii i wychwytu CO₂ oraz zastosowanie metod pomiarowych, modelowania przestrzennego i technik bazujących na sztucznej inteligencji, pozwolą na trwałą redukcję śladu węglowego.

Bibliografia:

- Afgan N.H., Carvalho M.G. (2002), *Multi-Criteria Assessment of New and Renewable Energy Power Plants*, „Energy” 27 (8): 739–755.
- Burmistrz P., Czepirski L., Gazda-Grzywacz M. (2016a), *Carbon Dioxide Emission in Hydrogen Production Technology from Coke Oven Gas with Life Cycle Approach*, <https://www.h2knowledgecentre.com/content/journal6377> [dostęp: 27.05.2025].
- Burmistrz P., Chmielniak T., Czepirski L., Gazda-Grzywacz M. (2016b), *Carbon Footprint of the Hydrogen Production Process Utilizing Subbituminous Coal and Lignite Gasification*, „Journal of Cleaner Production” 139 (12): 858–865.
- Casotto R., Skiba A., Rauber M., Strähl J., Tobler A., Bhattu D., Lamkaddam H., Manousakas M.-I., Salazar G., Cui T. et al. (2023), *Organic Aerosol Sources in Krakow, Poland, Before Implementation of a Solid Fuel Residential Heating Ban*, „The Science of the Total Environment” 855 (7): 158655.
- Dipto A.S., Al Bari M.A., Nabil S.T. (2020), *Sustainability Analysis of Different Types of Power Plants Using Multi-Criteria Decision Analysis Methods*, „Journal of Engineering Advancements” 1 (3): 94–100.
- Ecochain (2024), *Life Cycle Assessment (LCA) – Everything You Need to Know*, | <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/> [dostęp: 27.05.2025].
- Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Minx J.C., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S. et al. (red.) (2014), *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Asses. Rep. of the Intergov. Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York.
- Eurostat (2025), *Shedding Light on Energy in Europe – 2025 edition*, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2025> [dostęp: 7.05.2025].
- Frydel L., Prus Z., Cwynar K., Pamuła J., Pyssa J., Rego R., Styszko K. (2025), *Determination of Hydroxy Derivatives of PAHs in Sewage Sludge by GC-MS/MS*, „Desalination Water Treatment” 321 (4): 101015.
- Furman P., Styszko K., Skiba A., Zięba D., Zimnoch M., Kistler M., Kasper-Giebl A., Gilardoni S. (2021), *Seasonal Variability of PM10 Chemical Composition Including 1,3,5-Triphenylbenzene, Marker of Plastic Combustion and Toxicity in Wadowice, South Poland*, „Aerosol Air Qual Research” 21 (3): 200223.
- Gazda-Grzywacz M., Wincone Ł., Burmistrz P. (2021), *Carbon Footprint for Mercury Capture from Coal-Fired Boiler Flue Gas*, „Energies” 14 (13): 3844.
- Gazda-Grzywacz M., Grzywacz P., Burmistrz P. (2024), *Environmental Benefits of Hydrogen-Powered Buses: A Case Study of Coke Oven Gas*, „Energies” 17 (20): 5155.
- González-Mariño I., Baz Lomba J.A., Alygizakis N., Andrés-Costa M.J., Bade R., Barron L.P., Been F., Berset J.-D., Bijlsma L., Bodik I. et al. (2020), *Spatio-Temporal Assessment of Illicit Drug Use at Large Scale: Evidence from 7 Years of International Wastewater Monitoring*, „Addiction” 115 (1): 109–120.
- Government UK (2016), *Best Available Techniques: Environmental Permits*, <https://www.gov.uk/guidance/best-available-techniques-environmental-permits> [dostęp: 27.05.2025].
- Górecki J., Łoś A.K., Macherzyński M., Gołaś J., Burmistrz P., Borovec K. (2016), *A Portable, Continuous System for Mercury Speciation in Flue Gas and Process Gases*, „Fuel Processing Technology” 154 (2–3): 44–51.
- Górecki J., Burmistrz P., Trzaskowska M., Sottys B., Gołaś J. (2018), *Method Development and Validation for Total Mercury Determination in Coke Oven Gas Combining a Trap Sampling Method with CVAAS Detection*, „Talanta” 188: 293–298.
- Górecki J., Borovec K., Wałęka M., Burmistrz P., Pilar L., Skala M. (2024), *Evaluation of Mercury Sorbent Effectiveness Using a Vibration System*, „Measurement” 236: 115145.
- ISO 14040 (2006), *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*, <https://www.iso.org/standard/37456.html> [dostęp: 27.05.2025].
- ISO/TR 14047 (2012), *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Illustrative Examples on How to Apply ISO 14044 to Impact Assessment Situations*, <https://www.iso.org/standard/57109.html> [dostęp: 27.05.2025].
- Komisja Europejska (b.r.a), *Carbon Border Adjustment Mechanism*, https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en [dostęp: 27.05.2025].
- Komisja Europejska (b.r.b), *Environmental Impact Assessment*, https://environment.ec.europa.eu/law-and-governance/environmental-assessments/environmental-impact-assessment_en [dostęp: 27.05.2025].
- Komisja Europejska (b.r.c), *Industrial and Livestock Rearing Emissions Directive (IED 2.0)*, https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-and-livestock-rearing-emissions-directive-ied-20_en [dostęp: 27.05.2025].
- Komisja Europejska (2021), *Fit for 55*, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> [dostęp: 5.05.2025].
- Konduracka E., Krawczyk K., Surmiak M., Pudełek M., Malinowski K.P., Mastalerz L., Zimnoch M., Samek L., Styszko K., Furman L., Gałkowski M., Nessler J., Różański K., Sanak M. (2022), *Monocyte Exposure to Fine Particulate Matter Results in miRNA Release*:

- a Link Between Air Pollution and Potential Clinical Complication, „Environmental Toxicology and Pharmacology” 96: 103996.
- Niu D., Wang W., Liu Q. (2008), *Comprehensive Evaluation of Sustainable Development Capability for Thermal Power Plant under Market Competition*, [w:] 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IEEE.
- Pamuła J., Sochacka-Tatara E., Styszko K. (2025), Development of GC-ITQ-MS Chromatographic System for the Identification of Hydroxy Derivatives of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Wastewater, „Journal of Chromatography” 1752: 465969.
- PEP2040 (2022), *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski> [dostęp: 3.03.2025].
- Saaty T.L. (2004), *Fundamentals of the Analytic Network Process – Dependence and Feedback in Decision-Making with a Single Network*, „Journal of Systems Science and Systems Engineering” 13 (2): 129–157.
- Samek L., Turek-Fijak A., Skiba A., Furman P., Styszko K., Furman L., Stęgowski Z. (2020), *Complex Characterization of Fine Fraction and Source Contribution to PM_{2.5} Mass at an Urban Area in Central Europe*, „Atmosphere” 11 (10): 1085.
- Shaaban M., Scheffran J., Böhner J., Elsobki M.S. (2018), *Sustainability Assessment of Electricity Generation Technologies in Egypt Using Multi-Criteria Decision Analysis*, „Energies” 11 (5): 1117.
- Skiba A., Styszko K., Tobler A., Casotto R., Gorczyca Z., Furman P., Samek L., Widel D., Zimnoch M., Kasper-Giebl A., Slowik J.G., Daellenbach K.R., Prévôt A.S.H., Róžański K. (2024a), *Source Attribution of Carbonaceous Fraction of Particulate Matter in the Urban Atmosphere Based on Chemical and Carbon Isotope Composition*, „Scientific Reports” 14 (1): 7234.
- Skiba A., Styszko K., Furman P., Szramowiat-Sala K., Samek L., Gorczyca Z., Widel D., Kasper-Giebl A., Róžański K. (2024b), *Source Apportionment of Suspended Particulate Matter (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) Collected in Road and Tram Tunnels in Krakow, Poland*, „Environmental Science and Pollution Research” 31 (10): 14690–14703.
- Styszko K. (2016), *Sorption of Emerging Organic Micropollutants onto Fine Sediments in a Water Supply Dam Reservoir, Poland*, „Journal of Soils and Sediments” 16 (2): 677–686.
- Styszko K., Bollmann U.E., Wangler T.P., Bester K. (2014), *Desorption of Biocides from Renders Modified with Acrylate and Silicone*, „Chemosphere” 95: 188–192.
- Styszko K., Bollmann U.E., Bester K. (2015), *Leaching of Biocides from Polymer Renders under Wet/Dry Cycles – Rates and Mechanisms*, „Chemosphere” 138: 609–615.
- Styszko K., Proctor K., Castrignanò E., Kasprzyk-Hordern B. (2021), *Occurrence of Pharmaceutical Residues, Personal Care Products, Lifestyle Chemicals, Illicit Drugs and Metabolites in Wastewater and Receiving Surface Waters of Krakow Agglomeration in South Poland*, „Science of the Total Environment” 768: 144360.
- Styszko K., Bolesta W.A., Daso A.P., Kasprzyk-Hordern B. (2025a), *Antimicrobial Agents in Agricultural Fertilizers Produced from Sewage Sludge – A Cause for Concern?*, „Science of the Total Environment” 962 (4): 178433.
- Styszko K., Bolesta W.A., Worek J., Prus Z., Cwynar K., Pyssa J., Uchmanowicz D., Frydel L., Daso A.P., Kasprzyk-Hordern B. (2025b), *Tracking Nonregulated Micropollutants in Sewage Sludge: Antimicrobials, OH-PAHs, and Microplastics – Environmental Risks, Fertilizer Implications and Energy Considerations*, „Energy Reports” 13: 4756–4768.
- Styszko K., Pamuła J., Sochacka-Tatara E., Pac A., Kasprzyk-Hordern B. (2025c), *Estimation of Public Exposure to PAH and Environmental Risks via Wastewater-Based Epidemiology*, „Ecotoxicology and Environmental Safety” 292: 117920.
- Szramowiat-Sala K., Marczak-Grzesik M., Karczewski M., Kistler M., Kasper-Giebl A.K., Styszko K. (2025), *Chemical Investigation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Sources in an Urban Area with Complex Air Quality Challenges*, „Scientific Reports” 15: 6987.
- Szramowiat-Sala K., Penkala R., Horák J., Krpec K., Hopan F., Ryšavý J., Borovec K., Górecki J. (2024), *AI-based Data Mining Approach to Control the Environmental Impact of Conventional Energy Technologies*, „Journal of Cleaner Production” 472: 143473.
- Tokarski S. (2023), *Suwerenność energetyczna w polityce europejskiej i krajowej*, „Energetyka Rozproszona” 9: 17–24.
- Unia Europejska (2019), Document 52019DC0640, *Communication From the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions the European Green Deal*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> [dostęp: 5.05.2025].
- Worek J., Styszko K. (2025), *Comparative Study of Matrix Etching Methods for the Separation of Microplastics from Environmental Samples*, „Desalination Water Treat” 322 (8): 101140.
- Worek J., Kawoń K., Chwiej J., Berent K., Rego R., Styszko K. (2025), *Assessment of the Presence of Microplastics in Stabilized Sewage Sludge: Analysis Methods and Environmental Impact*, „Applied Sciences” 15 (1): 1.
- Woźniak A., Szramowiat-Sala K., Hirose T., Książek R., Gdowska K., Krawiec K. (2025), *Optimizing Algae Cultivation Conditions Using Reinforcement Learning – Improving Algae Growth to Advance Prospects of Biofuel Production and Carbon Dioxide Mitigation*.
- Zimnoch M., Samek L., Furman L., Styszko K., Skiba A., Gorczyca Z., Gałkowski M., Róžański K., Konduracka E. (2020), *Application of Natural Carbon Isotopes for Emission Source Apportionment of Carbonaceous Particulate Matter in Urban Atmosphere: A Case Study from Krakow, Southern Poland*, „Sustainability” 12 (14): 5777.

Energy and the environment

Abstract: The chapter presents ways of producing energy in accordance with the idea of sustainable development. The implementation of European environmental policy through a circular economy is described. The importance of access to environmental data and modern measurement techniques in quantitative and qualitative analyses was emphasised. The benefits of using classical methods and deep and reinforcement learning techniques for modelling energy processes were indicated. The use of innovative catalytic and sorptive materials for waste gas purification and carbon dioxide conversion and management is discussed. The importance of identifying and quantifying critical points along the fuel value chain is demonstrated. The importance of investment and regulatory decisions in the decarbonisation process is presented.

Keywords: sustainable development, decarbonisation, smart grids, monitoring systems, power production and consumption forecasting, machine learning, environmental analytics, SCR catalysis, CO₂ conversion

prof. dr hab. inż. Wiktoria Sobczyk

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Energetyki i Paliw
sobczyk@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Wskaźniki zrównoważonego rozwoju w technologii produkcji energii elektrycznej

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Jacek Sobczyk,
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią,
PAN Polska Akademia Nauk
prof. dr hab. inż. Wiktoria Sobczyk,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr hab. inż. Tadeusz Olkusiński, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

2. Mikrozanieczyszczenia i ocena ryzyka środowiskowego w aspekcie gospodarki cyrkularnej

dr hab. inż. Katarzyna Styszko, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Dominika Uchmanowicz,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

3. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego w analityce przemysłowej i środowiskowej

dr hab. inż. Jerzy Górecki, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Katarzyna Szramowiat-Sala,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

4. Nowe materiały i technologie katalityczne dla redukcji emisji oraz chemicznego zagospodarowania ditlenku węgla

prof. dr hab. inż. Monika Motak,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Bogdan Samojeden,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

5. Analiza środowiskowa technologii paliwowych

dr hab. inż. Piotr Burmistrz, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Magdalena Gazda-Grzywacz,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Przemysław Grzywacz,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
