



MONOGRAFIA

OCHRONA KLIMATU W POLSCE

WYBRANE ZAGADNIENIA I ROZWIĄZANIA



IOŚ-PIB

Institut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Redakcja naukowa:

Izabela Sówka • Krystian Szczepański • Wojciech Ślęczka

OCHRONA KLIMATU W POLSCE

WYBRANE ZAGADNIENIA I ROZWIĄZANIA

MONOGRAFIA

Niniejsza publikacja stanowi pokłosie zorganizowanej w 2022 roku konferencji naukowej pt. „Zeroemisyjna Polska – wyzwania przyszłości” z udziałem członków Państwowej Rady Ochrony Środowiska.

Publikacja objęta patronatem honorowym Ministra Klimatu i Środowiska



**Ministerstwo
Klimatu i Środowiska**

Praca zbiorowa pod redakcją naukową:

dr hab. inż. Izabeli Sówki, prof. PWr

dra inż. Krystiana Szczepańskiego

dra hab. kpt. ż.w. Wojciecha Ślączi, prof. PM

Recenzja naukowa:

dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. PŁ

dr hab. Maciej Kryza, prof. UW

Projekt graficzny, skład, korekta:

GroupMedia Agnieszka Pacholska

Wydanie I

Publikacja dostępna na licencji: [CC BY-NC-ND 3.0 PL](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/pl/)

ISBN 978-83-966110-1-7

Wydawca:

Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy

02-170 Warszawa, ul. Słowicza 32

tel. 22 37 50 558

www.ios.edu.pl

e-mail: wydawnictwa@ios.edu.pl

Wszystkie informacje zawarte w niniejszej publikacji odzwierciedlają wyłącznie poglądy autorów i nie należy ich traktować jako opinii, poglądów czy stanowiska Ministerstwa Klimatu i Środowiska ani Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego.

Spis treści

Słowo wstępne	10
Wprowadzenie	11

CZĘŚĆ I

Definiowanie pojęć w ochronie klimatu

Rozdział 1

Terminologiczna problematyka zmiany klimatu i zagadnień skojarzonych	13
Wstęp.....	13
Dyskusja nad terminologią powiązaną z ochroną klimatu	14
Relacje klimatologii ze zrównoważonym rozwojem	19
Podsumowanie.....	20

CZĘŚĆ II

System bilansowania i monitorowania emisji gazów cieplarnianych

Rozdział 1

System bilansowania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych.....	22
Wstęp.....	22
Krajowe uwarunkowania przygotowywania inwentaryzacji emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych	23
Emisja i pochłanianie gazów cieplarnianych w 2020 r.....	24
Emisja a cele redukcyjne.....	27
Podsumowanie.....	29

Rozdział 2

Monitoring i identyfikacja źródeł gazów cieplarnianych na obszarach miejskich.....	31
Wstęp.....	31
Obieg węgla w środowisku miejskim	32
Metody pomiarów i badań	33
Ocena udziału składowej antropogenicznej i biogenicznej CO ₂ w atmosferze miejskiej – studium Wrocławia	36
Podsumowanie i wnioski końcowe.....	39

CZĘŚĆ III

Możliwości i perspektywy rozwiązań w zakresie procesów adaptacyjnych i mitygacyjnych

Rozdział 1

Usługi ekosystemowe w ochronie klimatu i adaptacji do jego zmiany na terenach zurbanizowanych – rekomendacje dla Polski	47
Wstęp.....	47
Usługi ekosystemowe – wprowadzenie do problematyki.....	48
Usługi ekosystemowe na terenach zurbanizowanych w Polsce – wybrane wyniki badań.....	49
Usługi ekosystemowe miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa na rzecz klimatu.....	51
Wnioski.....	54

Rozdział 2

Przekształcenia w sektorze energetycznym i zakładach produkcyjnych w kierunku zmniejszania emisyjności	58
Wstęp.....	58
Emisyjność dwutlenku węgla i innowacyjność przemysłu	59
Zagadnienia dekarbonizacji i innowacji.....	62
Energochłonność produkcji na przykładzie wybranej gałęzi przemysłu	64
Podsumowanie.....	71

Rozdział 3

Recykling energetyczny – analiza parametrów strumieni odpadów w postaci alternatywnego paliwa RDF	74
Wstęp.....	74
Materiały i metody.....	77
Wyniki	81
Podsumowanie i wnioski	83

Rozdział 4

Geotermia jako element gospodarki niskoemisyjnej gmin	85
Wstęp.....	85
Perspektywy ujmowania wód termalnych	86
Bariery rozwoju geotermii	89
Stan udokumentowania zasobów wód termalnych.....	90
Charakterystyka ryzyka związanego z ujmowaniem i zagospodarowaniem wód termalnych	92
Stan zagospodarowania zasobów wód termalnych w Polsce	92

Wspieranie geotermii w Polsce i zadania na przyszłość	93
Podsumowanie.....	94

Rozdział 5

Magazynowanie i składowanie substancji w strukturach geologicznych 99

Wstęp.....	99
Polityka energetyczna Polski a magazynowanie i składowanie substancji.....	100
Magazynowanie gazu ziemnego (i innych nośników energii, w szczególności wodoru).....	101
Geologiczne składowanie dwutlenku węgla.....	106
Dyskusja i podsumowanie.....	109

Rozdział 6

Ograniczanie emisji do środowiska naturalnego czynników szkodliwych pochodzących z jednostek eksploatowanych na polskich obszarach morskich 112

Wstęp.....	112
Znaczenie transportu śródlądowego i morskiego w ograniczaniu emisji	113
Okrętowe źródła emisji	116
Metody ograniczania emisji i kierunki rozwoju statków niskoemisyjnych i zeroemisyjnych	119
Podsumowanie.....	122

Rozdział 7

Ocena wybranych technicznych rozwiązań na statkach morskich w kontekście ochrony klimatu..... 124

Wstęp.....	124
Zrównoważony rozwój transportu morskiego	126
Charakterystyka wybranych rozwiązań na statkach morskich	129
Analiza i ocena.....	138
Podsumowanie i wnioski	140

Materiał informacyjny

Zintegrowany System Obserwacji Węgla w Europie – polski udział w sieci badawczej..... 145

Wstęp.....	145
Struktura i znaczenie badań realizowanych w sieci ICOS na arenie międzynarodowej	146
Historia i struktura projektu ICOS–Polska	147
Podsumowanie i wnioski końcowe.....	148

Spis tabel

Część III. Możliwości i perspektywy rozwiązań w zakresie procesów adaptacyjnych i mitygacyjnych

Tabela 1.1. Korzyści z miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa z punktu widzenia ochrony klimatu	53
Tabela 2.1. Przykłady emisji CO ₂ w skali międzynarodowej w 2020 r.....	59
Tabela 2.2. Zakładowe wskaźniki jednostkowego zużycia energii elektrycznej (W _e) w przetwórstwie rolno-spożywczym	68
Tabela 2.3. Zakładowe wskaźniki jednostkowego zużycia ciepła (W _c) w przetwórstwie rolno-spożywczym.....	70
Tabela 3.1. Wartości opałowe polimerów najczęściej spotykanych w strumieniach odpadów	76
Tabela 3.2. Przeprowadzone badania	78
Tabela 3.3. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 1.....	81
Tabela 3.4. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 2.....	81
Tabela 3.5. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 3.....	82
Tabela 3.6. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 4.....	82
Tabela 3.7. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 5.....	82
Tabela 4.1. Liczba projektowanych otworów w celu ujęcia wód termalnych w poszczególnych województwach według stanu na 31.12.2020 r.....	89
Tabela 6.1. Wybrane czynności i procedury związane z eksploatacją statku oraz powstające w ich efekcie rodzaje zanieczyszczeń	116
Tabela 7.1. Wybrane statki wyposażone w Silverstream System.....	134
Tabela 7.2. Kryterium i skala oceny rozwiązań technicznych	139
Tabela 7.3. Ocena ekspercka rozwiązań technicznych według przyjętej skali.....	140
Materiał informacyjny	
Tabela. Planowana sieć stacji badawczych w ramach projektu ICOS-PL.....	148

Spis rysunków

CZĘŚĆ II. System bilansowania i monitorowania emisji gazów cieplarnianych

Rysunek 1.1. Udziały poszczególnych GC w całkowitej emisji krajowej (bez kategorii 4) w 2020 r.	25
Rysunek 1.2. Udziały poszczególnych kategorii źródeł w całkowitej emisji krajowej GC (bez kategorii 4) w 2020 r.	25
Rysunek 1.3. Zagregowane emisje gazów cieplarnianych (bez kategorii 4) w latach 1988-2020 według kategorii źródeł.....	26
Rysunek 1.4. Nadwyżki (kolor niebieski) i niedobory (kolor czerwony) w przyznanym limitach emisji w non-ETS w latach 2013-2020	29
Rysunek 1.5. Projekcje emisji gazów cieplarnianych w Polsce do 2040 r. według scenariuszy z obecnymi działaniami (WEM) i z dodatkowymi działaniami (WAM).....	30
Rysunek 2.1. Mapa siatki emisji CO ₂ zaadaptowana z inwentaryzacji EDGAR emisji antropogenicznych (podanych w Mg CO ₂ -eq) [Crippa i in. 2019] z Polski dla 2015 r. w rozdzielczości 0,1° × 0,1° i powiększeniu dla obszaru miejskiego Wrocławia o rozmiarze komórki siatki 7 km × 11,1 km.....	37

CZĘŚĆ III. Możliwości i perspektywy rozwiązań w zakresie procesów adaptacyjnych i mitygacyjnych

Rysunek 2.1. Koncepcja przemysłu 4.0	60
Rysunek 2.2. Rzeczywisty obiekt silnika i jego cyfrowy bliźniak	61
Rysunek 2.3. Zarys możliwości informatyzacji i cyfryzacji energetyki oraz przemysłu i innych odbiorców	63
Rysunek 2.4. Zakład przemysłu rolno-spożywczego jako użytkownik nośników energii (na przykładzie zakładu przetwórstwa nasion oleistych)	65
Rysunek 2.5. Zakresy stosowania wskaźników jednostkowego zużycia nośników energii w zakładach przemysłu rolno-spożywczego	66
Rysunek 3.1. Odpady dostarczone do Centrum Odzysku i Zakładu Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych, NewCo Sp. z o.o.....	77
Rysunek 3.2. Paliwo RDF po rozdrobnieniu odpadów do wielkości mniejszej niż 30 mm	79
Rysunek 3.3. Paliwo RDF po rozdrobnieniu mniejszym niż 30 mm składowane pod dachem w odpowiednich suszarniach w Centrum Odzysku i Zakład Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych, NewCo Sp. z o.o.....	80
Rysunek 3.4. Przykładowa próbka strumienia 1. rozdrobniona do rozmiaru mniejszego niż 1 mm i poddana homogenizacji przed badaniem.....	80
Rysunek 4.1. Wykorzystanie wód termalnych w Polsce na tle obszarów perspektywicznych dla ujmowania wód termalnych według stanu na 31.12.2020 r.....	87
Rysunek 4.2. Ilość projektowanych otworów w celu ujęcia wód termalnych w ramach zatwierdzonych projektów robót geologicznych, pozostających w mocy w latach 2014-2020	88

Rysunek 4.3. Zmiany zasobów eksploatacyjnych ujęć wód leczniczych i termalnych w latach 2000-2020	91
Rysunek 4.4. Zasoby eksploatacyjne i pobór wód termalnych i leczniczych termalnych w latach 2000-2020	91
Rysunek 5.1. Funkcjonujące podziemne sezonowe magazyny gazu ziemnego oraz ropy naftowej i paliw w Polsce	102
Rysunek 5.2. Struktury solne w Polsce, w tym odpowiednie do magazynowania wodoru jako nośnika energii.....	105
Rysunek 5.3. Schemat geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla	107
Rysunek 6.1. Emisje gazów cieplarnianych pochodzących z transportu towarów i osób, jako udział w całkowitej emisji gazów cieplarnianych w UE w 2017 r.	113
Rysunek 6.2. Obroty ładunkowe według portów i kategorii ładunkowych w 2020 r.	114
Rysunek 7.1. Zastosowanie efektu Magnusa w Rotorze Flettnera	130
Rysunek 7.2. Schemat pracy żagla eSAIL	130
Rysunek 7.3. Konstrukcja eSAIL.....	131
Rysunek 7.4. Schemat pracy żagla WINGSAIL.....	132
Rysunek 7.5. Konstrukcja WINGSAIL	132
Rysunek 7.6. Konstrukcja Silverstream System	133
 Materiał informacyjny	
Rysunek 1. Rozmieszczenie stacji badawczych ICOS. Kraje w kolorze jasnoróżowym nie są jeszcze członkami ICOS.....	147
Rysunek 2. Syntetyczne historia aktywności projektu ICOS–Polska (ICOS–PL), które miały doprowadzić do włączenia Polski do Europejskiej struktury badawczej ICOS.....	147

Słowo wstępne

Szanowni Państwo!

XXI wiek stawia przed nami ogromne wyzwania w obliczu zmieniającego się klimatu. Troska o środowisko naturalne stała się nie tylko priorytetem, ale i obowiązkiem każdego z nas. Powstrzymanie zmian klimatu jest trudnym długoterminowym wyzwaniem, przed którym stoi ludzkość, byśmy mogli nadal rozwijać się i prosperować bez uszczerbku dla dobrobytu przyszłych pokoleń.

Ministerstwo Klimatu i Środowiska wyznacza ramy prawne i podejmuje szereg działań mających na celu ochronę przyrody m.in. poprzez promowanie oszczędnego, a zarazem efektywnego korzystania z zasobów i surowców oraz inicjowanie procesów, które mają na celu zapobieganie zanieczyszczeniom i ich negatywnemu oddziaływaniu na środowisko.

Polski rząd aktywnie wspiera działania mające na celu realizację przedsięwzięć proekologicznych ukierunkowanych bezpośrednio na przyczynę problemu zanieczyszczenia powietrza oraz podniesienie efektywności energetycznej budynków mieszkalnych, a tym samym zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło i energię elektryczną.

Mamy świadomość, że trzeba działać już teraz, ale przy podejmowaniu decyzji musimy pamiętać o ich konsekwencjach dla wszystkich grup społecznych i zawodowych, szczególnie osób znajdujących się w trudnej sytuacji lub zatrudnionych w sektorach objętych transformacją energetyczną. Ograniczeniem dla nas są również dostępne zasoby, zwłaszcza finansowe i ludzkie, którymi musimy rozważnie gospodarować. Dlatego to tak istotne, byśmy korzystali z już dostępnych i opłacalnych metod ograniczania emisji, zwłaszcza w ciepłownictwie i energetyce, ale jednocześnie rozwijali obiecujące technologie pochłaniania gazów cieplarnianych.

Zapraszam do lektury monografii pt. Ochrona klimatu w Polsce – wybrane zagadnienia i rozwiązania, będącej wynikiem prac realizowanych przez przedstawicieli wybranych polskich ośrodków naukowych, którzy poprzez swoje aktywności wspierają działania zmierzające do neutralności klimatycznej. Jestem przekonana, że niniejsza publikacja spotka się zainteresowaniem wszystkich tych, którym leży na sercu troska o środowisko naturalne.

Jednocześnie składam podziękowania Autorom, a w sposób szczególny Członkom Państwowej Rady Ochrony Środowiska, za wkład merytoryczny oraz ich zaangażowanie we wspólną walkę na rzecz ochrony środowiska w Polsce.

Anna Moskwa
Minister Klimatu i Środowiska

Wprowadzenie

Monografia „Ochrona klimatu w Polsce – wybrane zagadnienia i rozwiązania” jest wynikiem prac zespołów, w których współautorami poszczególnych rozdziałów są przedstawiciele instytucji naukowych w Polsce, w tym członkowie Państwowej Rady Ochrony Środowiska, których działania i prace koncentrują się m.in. na tematyce związanej z ochroną klimatu.

Przyczynkiem powstania niniejszej zbiorowej pracy była organizowana w marcu 2022 roku konferencja naukowa Państwowej Rady Ochrony Środowiska „Zeroemisyjna Polska – wyzwania przyszłości”, podczas której przedstawiciele rady zaprezentowali aktywności i prace własnych grup roboczych w kontekście tematyki neutralności klimatycznej. Należy jednak podkreślić, iż przedłożona monografia nie jest jedynie efektem rozważań związanych z tematami poruszonymi podczas konferencji, ale zawiera treści, które w wybranych obszarach są ich rozwinięciem, jak również efektem prac naukowych, w tym badań i analiz realizowanych w ośrodkach oraz instytucjach, przede wszystkim reprezentowanych przez członków Państwowej Rady Ochrony Środowiska, którzy w niniejszej monografii podjęli się przygotowania poszczególnych rozdziałów.

W przedłożonej pracy można wyróżnić trzy główne części: tematykę wprowadzającą, będącą polemiką nad zagadnieniami związanymi z definiowaniem pojęć w obszarze ochrony klimatu; tematykę porządkującą kwestie związane z systemem zarządzania, bilansowania i monitorowania gazów cieplarnianych oraz tematykę związaną z przeglądem i analizą czy dyskusją nad wybranymi możliwościami oraz perspektywami rozwiązań w zakresie procesów adaptacyjnych i mitygacyjnych. Dodatkowym elementem pracy jest część podkreślająca znaczenie polskiego udziału w sieci badawczej Zintegrowanego Systemu Obserwacji Węgla w Europie.

Jako redaktorzy naukowcy jesteśmy świadomi, że poruszana w pracy tematyka jest bardzo rozległa. Mamy jednak nadzieję, że to opracowanie będzie dodatkowym głosem w tworzonym, rozwijanym i ciągle poddawanych dyskusjom w Polsce katalogu potencjalnych rozwiązań służącym osiągnięciu neutralności klimatycznej.

Izabela Sówka, Krystian Szczepański oraz Wojciech Ślącza



CZĘŚĆ I

Definiowanie pojęć w ochronie klimatu

Rozdział 1

Terminologiczna problematyka zmiany klimatu i zagadnień skojarzonych

dr Witold Lenart

emer., nauczyciel akademicki UW, członek PROŚ

Wstęp

Klimat jako ważny, niekiedy najważniejszy komponent środowiska, jest trudny przy ocenie jego zmian, w tym zmian antropogennych. Przy coraz częstszych wyzwaniach rozpoznawania procesów klimatotwórczych następujących w warunkach intensywnej antropopresji na obszarach o złożonej strukturze funkcjonalnej ocena taka prowadzi często do niedostatku badawczego. Wiąże się to ze skromnymi zasobami specjalistów klimatologów, złożonością metod opracowań klimatologicznych, w tym wykorzystywaniu danych pomiarowych i obliczeniowych do fizycznego oraz stochastycznego modelowania klimatu. Dodatkowo, obecny etap rozwoju badań – m.in. w zakresie obiegu energii w systemie atmosfera-litosfera-hydrosfera, roli wymiany wilgoci w tym systemie, skutków obecności aerozoli atmosferycznych, tworzenia się i ewolucji systemów cyrkulacji atmosferycznej, w tym w górnej troposferze oraz w powiązaniu z cyrkulacją oceaniczną, deglacjacji i aktywności słonecznej – można uznać za mało satysfakcjonujący. W ostatnich dekadach, odnotowując wspomniane niedostatki, ale i stały postęp badawczy, spotykamy się z nowymi poważnymi wyzwaniami wynikającymi z pojawiania się (i ujawniania się) rozlicznych zjawisk w przyrodzie i cywilizacji, które mają genezę klimatyczną i szerokie implikacje klimatologiczne. Odczuwa się zatem potrzebę wzmocnienia aplikacyjnego całej wiedzy o atmosferze, w tym klimatologii. Próby sprostania jej podejmują zarówno klimatolodzy, jak i badacze dziedzin pokrewnych.

W obliczu poważnego zainteresowania naukowego i praktycznego tematyką zmiany klimatu, w tym zmian antropogennych, w poniższym opracowaniu skoncentrowano się na wybranych kwestiach

terminologicznych. Tekst powstał w związku z prowadzonymi w końcu 2021 r. przygotowaniem Państwowej Rady Ochrony Środowiska do konferencji sumującej dotychczasową pracę w szeroko rozumianej dziedzinie wspierania neutralności klimatycznej.

■ Dyskusja nad terminologią powiązaną z ochroną klimatu

Na tle gorącej, dosłownie i w przenośni, problematyki antropogennych i naturalnych zmian, w tym zmiany klimatu, powstaje kwestia, w jaki sposób fakty i procesy przeobrażeń klimatu lokować w sferze wyzwań społecznych, gospodarczych, politycznych, także filozoficznych, medycznych, ekonomicznych, edukacyjnych i prawnych. Niewątpliwie wymaga to poprawności naukowej, przede wszystkim wywodzącej się ze źródeł poznawczych podstawowego problemu – a więc z klimatologii.

Najwcześniej problem ten pojawił się w ocenach środowiskowych, w szczególności w raportach oraz procesie oceny oddziaływania na środowisko (OOŚ) dla przedsięwzięć oraz planów, programów i strategii. Środowiskowe oceny działalności człowieka, dziś już niewątpliwie słusznie uważanej za istotną przyczynę przeróżnych deformacji systemu klimatycznego, powinny opisywać klimat jako jeden z najważniejszych komponentów środowiska, powinny odnotowywać ewolucję tego środowiska, a więc i klimatu, ale jednocześnie powinny oceniać możliwe zmiany warunków atmosferycznych, więc także klimatu, wywołane realizacją przedsięwzięcia czy wdrożeniem dokumentu strategicznego lub planu. Zasadne wydaje się stosowanie ciągu rozumowego o takiej oto strukturze: oceniany projekt złożony został w dobie wyraźnego, szybkiego ocieplenia, które obejmuje całą Ziemię prawie równomiernie; następstwa tego ocieplenia są w zdecydowanej większości negatywne dla środowiska i człowieka; należy zatem wyeliminować z projektu te zagrożenia (emisje, wyczerpywanie zasobów, zmiany podłoża, obiegu energii i materii), które mogą przyczynić się do pogłębienia procesu ocieplenia. Zatem ekspert badający relacje cywilizacja – klimat nie musi powoływać się na światowy konsensus w sprawie odpowiedzialności cywilizacji za globalne ocieplenie – wystarczy, że udowodni lub uprawdopodobni taki związek w ramach ocenianego przedsięwzięcia. Postępowanie takie nazwiemy separatyzmem obiektywnym. Zauważmy, że jest ono dość powszechnie stosowane w procesie OOŚ, gdzie w zasadzie nie mamy do czynienia z kategorycznym, funkcyjnym związkiem pomiędzy obserwowanym procesem lub zjawiskiem, a konkretną przyczyną, w tym przyczyną antropogenną. Na tym tle rodzi się podstawowy paradygmat na styku nauki i praktyki: w obliczu niedostatecznego rozpoznania bazy deterministycznej, obserwowane zjawisko oceniamy na podstawie udowodnianych skutków.

W sferze terminologicznej powinniśmy zatem posługiwać się określeniem „zmiany klimatu” w najszerszym rozumieniu, to znaczy bez ograniczenia przyczyn, okresu oraz skal przestrzennych i czasowych. Należy tu zwrócić uwagę, że klimatologia fizyczna jeszcze pół wieku temu kojarzyła ten termin z badaniem historycznej ewolucji klimatu i predykcją jego naturalnych zmian. Wśród nielicznych wyjątków od takiego podejścia lokują się prace M.I. Budyko, np. [1975], dobrze znane w Polsce dzięki tłumaczeniom. Zaledwie w kilku monografiach klimatologii ogólnej, zob. np. [Crowe 1971; Gribbin 1978], eksponowane są antropogenne źródła zmiany klimatu. Natomiast najwcześniejsze i w miarę pełne wylistowanie tych źródeł znajdujemy w fundamentalnym raporcie studiów nad cywilizacyjnym

oddziaływaniem na klimat – Inadvertent Climate Modification [1971]. Późniejsze i współczesne monografie klimatu rozumianego jako system fizyczny obrazują stanowisko autorów, którzy, jeśli decydują się na taką deklarację, pozycjonują się pomiędzy połowicznymi i zdecydowanymi zwolennikami roli człowieka we współczesnych zmianach klimatu. Pozytywnie należy odczytać najnowszą polską literaturę, w tym zwłaszcza o charakterze popularnonaukowym, np. [Lenart 2008].

Podjęcie ocenowe, tzn. zgodne z Dyrektywą Unijną w sprawie OOS/EIA, pozwala na zaproponowanie także drugiego terminu, coraz częściej dziś stosowanego choć bez należynej precyzji. Chodzi o mitygację. Tu nieporozumienia dotyczą zarówno procedury lokalizacyjnej i planistycznej, jak i analizy zalecanych działań proklimatycznych lub środowiskowych. Mitygacja to zbiór wynegocjowanych, a więc *a priori* postulowanych, zabiegów wszelkiego rodzaju (nie tylko technicznych) umożliwiających łagodzenie, czasami nawet usuwanie niekorzystnych działań wywoływanych działalnością człowieka. A więc mitygacja nie obejmuje posunięć i decyzji zagwarantowanych przez obowiązujące prawo, w tym miejscowe, a nawet ustanowione kazuistycznie. Szeroko rozumiane zabiegi, z podaniem zasięgu spodziewanych efektów (globalnych, regionalnych, lokalnych), składają się zatem na listę proponowanych a następnie zatwierdzonych działań, które powinny przyczynić się do złagodzenia niekorzystnych zmian klimatu i/lub pogłębienia się szkodliwych następstw tych zmian. Przy czym na liście tej winny znaleźć się pozycje „nowe”, wykraczające jakościowo lub/i ilościowo poza obowiązujący formalnie standard. Środki mitygujące spodziewane antropogenne zmiany klimatu wymagają dogłębnego rozpoznania wykorzystywanych i uruchamianych procesów, przede wszystkim fizycznych, chemicznych i biologicznych, ale też społecznych, w najszerszym rozumieniu. Należy także pamiętać o tym, że mitygacja wymaga organizacji systemów monitorowania efektów i zagrożeń wtórnych.

Trzecim aspektem rodzącym potrzebę czystości terminologicznej jest transmisja zmian globalnych i regionalnych klimatu do mezoskali i skal lokalnych. To sfera klimatu lokalnego. Zajmując się klimatem lokalnym i miejscowym należy pamiętać, że klimat globalny jest kompozycją klimatów w większych skalach (mamy na myśli skalę topograficzną).

Regionalizacja klimatyczna, wzorem fizyczno-geograficznej, obejmuje jednostki autonomiczne oraz powtarzalne. Te pierwsze identyfikowane są głównie przez imiona własne z kategorii krajobrazowych, rzadziej poprzez określanie swoistych cech warunków cyrkulacyjnych, radiacyjnych lub aerosanitarno-bioklimatycznych. Rozdzielanie jednych od drugich bywa trudne, zawsze niejednoznaczne. Jest to zrozumiałe w obliczu bardzo umownych granic pomiędzy objętościami powietrza. Trudność wynika także z niedostatku danych reprezentatywnych dla ograniczonych przestrzeni i czasowo klimatów. Tak jest w przypadku często poddawanego badaniom klimatu miasta, który zawsze jest autonomiczny, ale budowany z powtarzalnych jednostek nawiązujących do typowych struktur urbanistycznych i kategorii użytkowania terenu. Warto też zauważyć, że w przypadku większych skal oczekiwane są nie tylko trudne do uzyskania dane charakterystyczne parametrów klimatycznych (przeciętne, frekwencyjne, zespolone), ale też informacje o wiodących procesach fizycznych, geochemicznych i innych przyrodniczych uwarunkowanych klimatycznie. Z tego powodu podział na skale klimatu pozostaje dyskusyjny i przedstawione tu sugestie tak należy traktować. Można przyjąć,

że postęp w zakresie klasyfikacji typologicznej klimatu będzie następował wraz z rozpoznawaniem wpływu antropopresji na warunki atmosferyczne.

Wskazanie zjawisk, procesów oraz sposobów użytkowania zasobów i przestrzeni, które mogą przyczynić się do zmian klimatu w różnych skalach, w tym do zmian o określonych kierunkach, jest zadaniem, które już wielokrotnie wykonywano na długo przed światowym otwarciem na globalne ocieplenie. Pierwsze pozycje wskazujące na możliwe następstwa klimatyczne przeróżnych aktywności cywilizacyjnych ukazały się w latach 30. ubiegłego wieku. Mowa o fundamentalnych pracach nad klimatem miasta.

Właściwe rozpoznanie tej kwestii wymaga rekomendowania środków mogących regulować oddziaływanie na klimat, a więc zmniejszających deformację lokalnego i regionalnego bilansu radiacyjnego, i szerzej: cieplnego, bilansu wodnego, cyrkulacji lokalnej i regionalnej, warunków odczuwalnych (bioklimatycznych), parametrów wpływających na sytuację aerosanitarną itd. Tu pojawia się więc stary termin „melioracja klimatu”, ale i nowy „adaptacja do (zmiany) klimatu”. W obu przypadkach mamy do czynienia z działaniami zamierzonymi i o charakterze imisyjnym, to znaczy z ograniczeniem przestrzennym, uwarunkowanym parametrami energetycznymi podjętego wysiłku. Melioracja ma założenia i zasięg bardziej uniwersalny, adaptacja, raczej funkcjonalny. Zdecydowanie trafniej jest używać określenia melioracja i adaptacja klimatyczna, gdyż bardzo trudno przedsięwziąć prace pozwalające na dostosowanie się do postępujących zmian, których zasięgu przecież nie znamy i prędko nie poznamy. Zatem melioracja i adaptacja to działania z kręgu przyrodniczych podstaw planowania przestrzennego, szczególnie pożądane w miastach, na obszarach rekreacyjnych, w obrębie cennych agrocenoz, obszarów przebudowy stosunków wodnych itp.

W tym kontekście należy lepiej usadzić bardzo popularny dziś termin „gospodarka/polityka nisko-emisyjna” oraz „neutralna klimatycznie”. W pierwszym przypadku zastrzeżenie budzi człon „emisyjna”, gdyż pożądanym efektów oczekujemy w rozumieniu imisyjnym (klimat reaguje na emisję, a nie na emisję, która może kończyć się np. procesami konwersji, dyssypacji lub bezpiecznego pochłaniania). Z kolei „neutralność klimatyczna” powinna być dobrze zdefiniowana, jeśli w ogóle mamy ją przywoływać. Być może chodzi tu po prostu o „ochronę klimatu” – termin, który pewnie byłby przyjmowany niechętnie, gdyż jest zachowawczy, choć jest prosty i zrozumiały. Działania proklimatyczne zmierzają wszak do przywrócenia warunków, do których cywilizacja się przystosowała, czyli do znanych lub badanych paleoklimatycznie w okresie sprzed epoki industrialnej.

W tym miejscu wypada wymienić te technogenne procesy, a także zmiany – ważnych dla tworzenia klimatu lokalnego, regionalnego i globalnego elementów środowiska abiotycznego, biotycznego i kulturowego, które powinny być zidentyfikowane, a także, w miarę możliwości badawczych, skwantyfikowane. Nie jest to powszechnie stosowane przy wdrażaniu tak popularnych obecnie zadań adaptacyjnych.

Zatem przede wszystkim trzeba wskazać wszystkie źródła i drogi emisji ciepła sztucznego. Emisja taka odbywać się może drogą promieniowania (ciała sztucznie cieplejsze emitują promieniowanie długofalowe, które praktycznie w całości jest absorbowane przez atmosferę lub inne powierzchnie, naturalne i sztuczne). Często ważniejszą drogą uwalniania ciepła jest parowanie technologiczne

będące wynikiem podgrzewania różnego rodzaju zbiorników i powierzchni wodnych, a także wymuszonego wprowadzania do dolnej troposfery pary wodnej lub wody w postaci rozdrobnionej (kropelkowej) z różnego rodzaju urządzeń, nie koniecznie związanych z chłodzeniem. Przenoszenie ciepła drogą przewodnictwa jest w zasadzie tylko pośrednim ogniwem przed promieniowaniem lub uwalnianiem ciepła drogą utajoną. Może jednak następować przenoszenie ciepła z powierzchni i obiektów technogennych, bez pośrednictwa zmian fazowych. Mowa tu o ciepłe przekazywanym wyższym warstwom troposfery na drodze wymiany turbulencyjnej i konwekcji. W tym drugim przypadku zwykle równocześnie pojawia się transport utajony. Zjawiska te są dobrze znane badającym wpływ dużych zakładów przemysłowych na klimat, a także studiującym wpływ zabudowy, a więc np. miast, na warunki atmosferyczne. Strumień sztucznego ciepła wzbogacający naturalne ciepło dolnej troposfery może być nawet lokalnie porównywalny z naturalnym, słonecznym.

Następną grupą procesów prowadzących do lokalnego i regionalnego ocieplenia są zmiany parametrów powierzchni czynnej. Mowa przede wszystkim o zmianach albedo, ale i o przekształceniach innych parametrów fizycznych (szorstkość podłoża, pojemność cieplna, warunki infiltracji). Zdecydowana większość działań cywilizacyjnych prowadzi do obniżenia albedo, a więc zwiększenia zdolności pochłaniania promieniowania słonecznego i zwrotnego. Zmiany są niewielkie, ale praktycznie jednokierunkowe. Istnieją tu także możliwości łagodzenia ocieplenia poprzez sztuczne podwyższanie albedo.

Kolejną grupą identyfikowanych rodzajów wpływów są te, które wiążą się z modyfikacjami efektu cieplarnianego. Przede wszystkim wzmacnianiem go, ale też przebudowywaniem struktury. Należy analizować możliwość znaczącego uwalniania wszystkich gazów cieplarnianych, nawet tych, których łączne znaczenie wymuszające jest obecnie bardzo małe, choć wskaźnikowe bywa bardzo wysokie.

Wreszcie w sposób pośredni na warunki klimatyczne oddziałuje zmiana zagospodarowania, zwłaszcza wprowadzanie i likwidacja zieleni, dekompozycja systemu wód powierzchniowych, zabudowy, a nawet małej architektury. Wszystkie wymienione wyżej grupy oddziaływań mają liczne odmiany, co stwarza potrzebę dość rozległego potraktowania kwestii niezamierzonych zmian klimatu. Przy okazji oszacować należy także ewentualne efekty zmian zamierzonych. Coraz częściej zaawansowane technologie korzystają z możliwości, jakie daje lokalna ingerencja w procesy atmosferyczne. Dotyczy to zwłaszcza rolnictwa i transportu lotniczego, ale działania takie zaczyna się także stosować w budownictwie miejskim, chłodnictwie i przez siły zbrojne.

Z powyższym wiąże się, wcale nie prosta, kwestia rozdzielenia skutków negatywnych od obojętnych lub nawet pozytywnych. W przypadku klimatu należy rozdzielić je według poszczególnych cech bądź grup cech. Wszak nie można uniwersalnie zadekretować całości zmiany klimatu jako pozytywnych lub negatywnych. Ponadto nie ma sensu odnoszenie się do klimatu optymalnego, bo nawet jeśli da się określić jego parametry, to znajdziemy go w bardzo specjalnych miejscach, gdy reszta świata nie ma szans zbliżyć się do takich warunków kiedykolwiek. W sytuacji niedostatku lub nadmiaru jednej grupy zasobów (ciepła, wilgoci, ruchu powietrza, frekwencji zjawisk ekstremalnych) niemożliwe jest wskazanie, jakie zmiany innych parametrów są korzystne lub nie. Elementy klimatu są ponadto pozbawione obiektywnych skal oceny wartości, gdyż ludzie nie kojarzą sobie takiej wartości

z procesami w rodzaju: parowanie, transport pary wodnej, cyrkulacja lokalna, wodność chmur itd. Nie ma także estetycznych standardów zjawisk meteorologicznych z wyróżnianiem negatywnych. Szron może być piękny, choć groźny, chmury wewnątrzmasowe rzadko bywają brzydkie itd. Prościej jest z emisjami do atmosfery, czy przekształcaniem powierzchni ziemi.

Wreszcie kolejny aspekt, może wymagający mniejszego rozmiaru analiz, ale za to poważnego wysiłku intelektualnego. Planowane przedsięwzięcie należy umieścić w zmienionych warunkach, które powstają w miarę pogłębiania się globalnego ocieplenia, ale też w miarę stopniowo narastających reakcji na to ocieplenie. Należy spodziewać się, że za 10-15 lat będziemy odmiennie oceniali różne rozwiązania techniczne i technologiczne, w szczególności w zakresie energetyki, transportu, gospodarki wodnej. Trzeba starać się to przewidzieć. Z drugiej strony potrzebne będzie także zauważenie odmienności warunków przyrodniczych zmienionych przez ocieplenie i związane z nim deformacje innych parametrów meteorologicznych.

Szersze uwagi dotyczące się terminów melioracja i adaptacja wiążą się z bardzo jeszcze raczkującym procesem wdrażania konkretnych zabiegów. Przy okazji zwraca się uwagę na wielorakość antropogenicznych przyczyn zmian klimatu, dość powszechnie upraszczanych do narastania efektu szklarniowego. Tu nasuwa się ewentualność powrotu do dobrego terminu „sozotechnika”, a więc „sozotechnika klimatyczna”.

Specyfiką zmiany klimatu, w stosunku do przeobrażeń innych komponentów (litosfery, hydrosfery, pedosfery, biosfery), jest stosunkowo konsekwentny fizycznie łańcuch przyczynowo-skutkowy, a więc wyraźnie węższy niż np. przy analizie następstw melioracji wodnych czy deforestacji. Zmiana klimatu ma bowiem nie do końca poznany, ale twardy deterministycznie obraz, tak jak prognoza pogody jest osiągalna w doskonałości pełnej, choć skrajnie trudna ze względu na ogrom niezbędnych danych i zastosowanych algorytmów. Dlatego pisząc o możliwych następstwach globalnego ocieplenia wiemy, że poruszamy się po wielowymiarowym polu ograniczonym strefami prawie absolutnej niemożności. Podobnie jak nieskończona różnorodność kształtów śnieżynek jest uwięziona w ich heksagonalnym schemacie.

Kolejną sferą źródłową dla terminologii związanej ze zmianą klimatu jest, zgodnie z tym co napisano wyżej, problematyka topoklimatyczna. W obecnej dobie większość studiów dotyczących klimatu w dużej skali (w sensie topograficznym) prowadzonych jest w związku z różnymi wpływami cywilizacyjnymi. W zasadzie niemalże ustały prace podstawowe mające na celu rozpoznawanie klimatów nieautonomicznych, może z wyjątkiem klimatu zbiorowisk leśnych oraz naturalnych zbiorników wodnych. Inne badane przestrzenie nieautonomiczne to obiekty sztuczne lub zmienione przez człowieka. Można tu używać terminu „antropotopoklimatologia”. Zwrócić należy uwagę na to, że zakres badawczy dobrze wyodrębnionych działów nauk o atmosferze dotyczących związków (obustronnych) z sektorami działalności cywilizacyjnej, w ostatnich latach silnie się rozszerza obejmując oprócz kwestii przyrodniczo-aplikacyjnych także studia nad ewolucją obustronnych związków, a nawet elementy melioracji i adaptacji. Bardzo istotnym ogniwem takich badań jest metodologia i praktyka predykcji, zarówno uniwersalna, jak i regionalna, rzadziej globalna. Mowa tu o takich, dawno wykształconych działach, jak agroklimatologia, bioklimatologia szczegółowa i medyczna, klimatologia

techniczna, klimatologia urbanistyczna, hydroklimatologia praktyczna, klimatologia transportu a nawet militarna. We wszystkich wymienionych, ale też w innych jeszcze węższych i nowo rodzących się działach, aspekt szybko postępujących zmian klimatu planetarnego oraz w większych skalach, staje się obecnie wiodący. Ustanawiane kiedyś związki warunków atmosferycznych z funkcjonowaniem gospodarki zależnej od klimatu – praktycznie zatem każdej – szybko tracą aktualność, a w wielu przypadkach następuje całkowita przebudowa fundamentów wiedzy o tych związkach. Szczególnie jaskrawe przemiany, a więc także przykłady, dotyczą gospodarki wodnej, rolnictwa, leśnictwa i generalnie gospodarki przestrzennej, zwłaszcza na obszarach zurbanizowanych.

W podobnym kierunku rozbudowują się tradycyjne działy nauk o atmosferze, szybko wchłaniające spojrzenie prognostyczne, które powinno uwzględniać zmiany antropogenne oraz wtórne zmiany wywołane przemianami środowiska. Oprócz wymienionej wyżej hydroklimatologii inna jest dziś aeroklimatologia, krioklimatologia itd.

Odrębną dziedziną o wyraźnie rosnącym znaczeniu w obliczu szybkiej zmiany klimatu jest klimatologia interpretująca sytuacje aerosanitarne; można napisać: klimatologia zanieczyszczeń atmosfery. Chodzi tu zarówno o skalę globalną i regionalną, jak i skale większe (od „mezo- do topo-“). Spodziewać się należy wyodrębnienia się tego działu i ustanowienie stosownej nazwy.

Relacje klimatologii ze zrównoważonym rozwojem

Na zakończenie tego przeglądu wypada zwrócić jeszcze uwagę na rosnący związek problematyki zmiany klimatu z fundamentalnymi wyzwaniami środowiskowymi współczesnego świata. Należy spodziewać się wyróżnienia działów łączących naukę o ziemskiej atmosferze z tymi wyzwaniami; przy wykorzystaniu bogactwa nowych paradygmatów. Warte prześledzenia są wybrane dalej przykłady ze znanej matrycy celów zrównoważonego rozwoju. Wymienione cele należy rozumieć globalnie, regionalnie i lokalnie (użyto nazw oryginalnych dla uniknięcia błędów nieprecyzyjnej translacji).

1. **Poverty:** nierówność w dostępie do miejsc i warunków mniej podatnych na skutki zmian klimatu.
2. **Hunger and food security:** dyferencjacja potencjalnych plonów z tendencją do niekorzystnych zmian na obszarach głodu i nadwyżek plonów.
3. **Health:** nowe choroby w cieplejszym klimacie i dyskomfort termiczny; skutki zjawisk ekstremalnych.
4. **Education:** rzetelna wiedza o przyczynach, skutkach i adaptacji do zmian klimatu, nowa metodyka nauczania o klimacie.
5. **Gender equality and women’s empowerment:** zmiany klimatu a życie w rodzinie oraz decyzje prokreacyjne.
6. **Water and sanitation:** nowe wyzwania dla sanitacji w warunkach ocieplenia i przebudowy obiegu wody.
7. **Energy:** bezpośrednia zależność opcji energetycznych i postępu w ociepleniu.
8. **Economic growth:** obiektywne scenariusze rozwoju na cieplejszej Ziemi.
9. **Infrastructure, industrialization:** przemysł i instalacje infrastrukturalne w dobie globalnego ocieplenia.

10. **Inequality:** zmiany klimatu zwiększające nierówności występujące na świecie, we wszystkich skalach; sposoby oddalenia takich zagrożeń.
11. **Cities:** miasta adaptujące się do „nowego” klimatu, miasta jako obiekt melioracji i ochrony klimatu.
12. **Sustainable consumption and production:** reakcja na szybkie zmiany w podaży żywności.
13. **Climate change:** rodząca się interdyscyplinarna dziedzina nauk przyrodniczych i społecznych.
14. **Oceans:** największa zagadka związana ze zmianami klimatu wymagająca pilnego rozwiązywania.
15. **Biodiversity, forests, desertification:** potężna sieć powiązań ze zmianami klimatu, przeważnie powiązań generujących zagrożenia i straty; pilna potrzeba zwiększenia potencjału badawczego.
16. **Peace and justice:** konflikty „klimatyczne”, prawne, społeczne i militarne.
17. **Partnerships:** konieczność współpracy na wszystkich poziomach.

■ Podsumowanie

Mając na uwadze powyższą dyskusję, rekomenduje się stosowanie uniwersalnej nazwy działu klimatologii „zmiana klimatu”. Tak rozumiany zakres wiedzy klimatycznej ma oczywiste aspekty aplikacyjne. Mieszczą się one w obrębie określeń: „melioracje i adaptacje klimatu”, także „monitoring klimatyczny”. Działania zmierzające do stabilizacji korzystnych warunków klimatycznych powinny się określać terminem „ochrona klimatu”. Aplikacyjne i komponentalne działy klimatologii zyskują aspekt antropogenicznej predykcji, co na razie nie prowadzi do zmian terminologicznych. Przy czym takie działy, jak klimat miasta, klimatologia aerosanitarna, czy bioklimatologia ewolucyjna stają się ważnymi elementami nauk o atmosferze i środowisku.

Literatura:

- Budyko M.I. 1975. Klimat i życie. PWN, Warszawa.
- Crowe P.R. 1971. Concepts in climatology. Longmann, London.
- Gribbin J. 1978. Climatic change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Inadvertent Climate Modification. 1971. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Ma.
- Lenart W. 2008. Zmiany klimatu. Fundacja na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju, Warszawa.

Wybrane adresy internetowe:

- Dyrektoriat Generalny ds. Klimatu Komisji Europejskiej – <https://ec.europa.eu/info/departments/climate-action>
- Europejska Agencja (Ochrony) Środowiska – <https://www.eea.europa.eu>
- Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatu – <http://www.ipcc.ch>
- Sekretariat Konwencji Klimatycznej – <https://unfccc.int>
- World Resources Institute – <http://www.wri.org/>
- World Meteorological Organization – <https://public.wmo.int>



CZĘŚĆ II

System bilansowania i monitorowania emisji gazów cieplarnianych

Rozdział 1

System bilansowania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych

dr inż. Krystian Szczepański

mgr inż. Paweł Mzyk

mgr inż. Anna Paczosa

mgr Anna Olecka

Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy

■ Wstęp

Od wielu lat na świecie trwają prace zmierzające do ograniczenia antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych, m.in. poprzez zobowiązanie krajów do redukcji ich emisji. Prace toczą się zarówno na arenie międzynarodowej (ONZ), jak i europejskiej. Wprowadzane są nowe wymagania i przepisy, które zobowiązują kraje do działań zmierzających do ochrony klimatu. Należy jednak zwrócić uwagę, że w celu weryfikacji, czy ustalane zobowiązania są realizowane, niezbędne jest zinventaryzowanie wielkości emisji. Inwentaryzacja emisji wykorzystywana jest również do określenia stanu wyjściowego przy określaniu potrzeb dotyczących redukcji emisji, a także przy ustalaniu działań podejmowanych w ramach strategii czy planów redukcji. Z tych powodów rola inwentaryzacji emisji jest bardzo istotna.

Polska od 1994 r. jest sygnatariuszem Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (Dz.U. 1996 nr 53 poz. 238) (UNFCCC) i od 2002 r. – Protokołu z Kioto (PK). Już od połowy lat 90. XX w. w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym są opracowywane krajowe inwentaryzacje emisji gazów cieplarnianych zgodnie z wymogami ww. konwencji. W 2009 r. zadanie to zostało uregulowane Ustawą z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz.U. z 2020 r. poz. 1077 z późn. zm.) – zwanej dalej USZE.

Krajowe uwarunkowania przygotowywania inwentaryzacji emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych

Jednostką odpowiedzialną za wykonywanie polskich inwentaryzacji gazów cieplarnianych jest utworzony na mocy USZE Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) funkcjonujący w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym (IOŚ–PIB). Zgodnie z art. 11 tej ustawy krajowy ośrodek przygotowuje i przekazuje ministrowi właściwemu ds. klimatu roczne inwentaryzacje gazów cieplarnianych (GC). Inwentaryzacje emisji GC wykonywane są zgodnie z obowiązującymi decyzjami przyjętymi przez strony konwencji UNFCCC i co roku podlegają przeglądom międzynarodowym (a w UE dodatkowo unijnym), w trakcie których jest sprawdzana poprawność ich wykonania oraz zgodność z obowiązującymi przepisami.

Aby inwentaryzacje emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych raportowane przez kraje strony konwencji klimatycznej były porównywalne, wykonywane są na podstawie wytycznych metodycznych do szacowania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych, opracowanych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC), wskazanych w stosownych decyzjach Konferencji Stron Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych ws. zmian klimatu (UNFCCC). Inwentaryzacje emisji obejmują następujące gazy i grupy gazów cieplarnianych: dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), podtlenek azotu (N_2O), grupę gazów HFC (fluorowęglowodory), grupę gazów PFC (perfluorowęglowodory), sześćfluorek siarki (SF_6) oraz trójfluorek azotu (NF_3). Są one raportowane według klasyfikacji i w formie tzw. tablic wspólnego raportowania (CRF) w pięciu głównych kategoriach źródeł: 1. Energia, 2. Procesy przemysłowe i użytkowanie produktów, 3. Rolnictwo, 4. Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo (LULUCF) oraz 5. Odpady.

Podstawą do szacowania emisji z krajowych źródeł są dane statystyczne publikowane przez Główny Urząd Statystyczny (GUS) oraz baza danych Eurostatu (zasilana przez GUS krajowymi danymi). Najistotniejszą część aktywności stanowi bilans energii obejmujący dane o krajowym zużyciu paliw dla źródeł stacjonarnych i mobilnych, z rozbiciem na rodzaj paliwa i kategorie. Pozostałe dane statystyczne obejmują produkcję przemysłową, rolniczą czy informacje związane z gospodarką odpadami i ściekami. W przypadku kategorii, dla których brak jest oficjalnych danych statystycznych, wykorzystywane są wyniki opracowań specjalistycznych lub ocen eksperckich. Wskaźniki emisji dla głównych źródeł emisji opracowywane są na podstawie badań krajowych, a w przypadku braku wskaźników krajowych lub w przypadku ich dużej niepewności przyjmowane są domyślne wskaźniki publikowane w obowiązujących wytycznych IPCC.

Dodatkowo eksperci KOBiZE mają dostęp do danych emisyjnych przedkładanych przez przedsiębiorstwa uczestniczące w unijnym systemie handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS). Te zweryfikowane dane są wykorzystywane w niektórych sektorach inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych, np. w podkategoriach procesów przemysłowych. Również dane zgromadzone w krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji, prowadzonej przez KOBiZE, obejmujące obecnie ok. 50 tys. raportów od podmiotów korzystających ze środowiska w zakresie emisji gazów cieplarnianych, są wykorzystywane w procesie przygotowania inwentaryzacji emisji.

Nadzór nad wykonywaniem zadań realizowanych przez KOBiZE sprawuje minister właściwy do spraw klimatu. Przed oficjalnym zgłoszeniem krajowa inwentaryzacja przechodzi wewnętrzny proces zatwierdzenia. Jednostką odpowiedzialną za akceptację wyników inwentaryzacji jest Ministerstwo Klimatu i Środowiska.

Zgodnie z unijnymi zasadami [Rozporządzenie 2013] krajowe inwentaryzacje państw członkowskich są zgłaszane do europejskiego repozytorium danych [EIONET CDR] dwukrotnie: wersja wstępna do 15 stycznia oraz wersja ostateczna do 15 marca. Ta ostatnia wersja zgłaszana jest również do sekretariatu konwencji UNFCCC do 15 kwietnia, zarówno przez państwa członkowskie indywidualnie, jak i łącznie we wspólnym raporcie jako inwentaryzacja Unii Europejskiej. W przypadku konieczności aktualizacji krajowej inwentaryzacji, kraje mogą je zgłaszać najpóźniej do 27 maja na forum konwencji i UE.

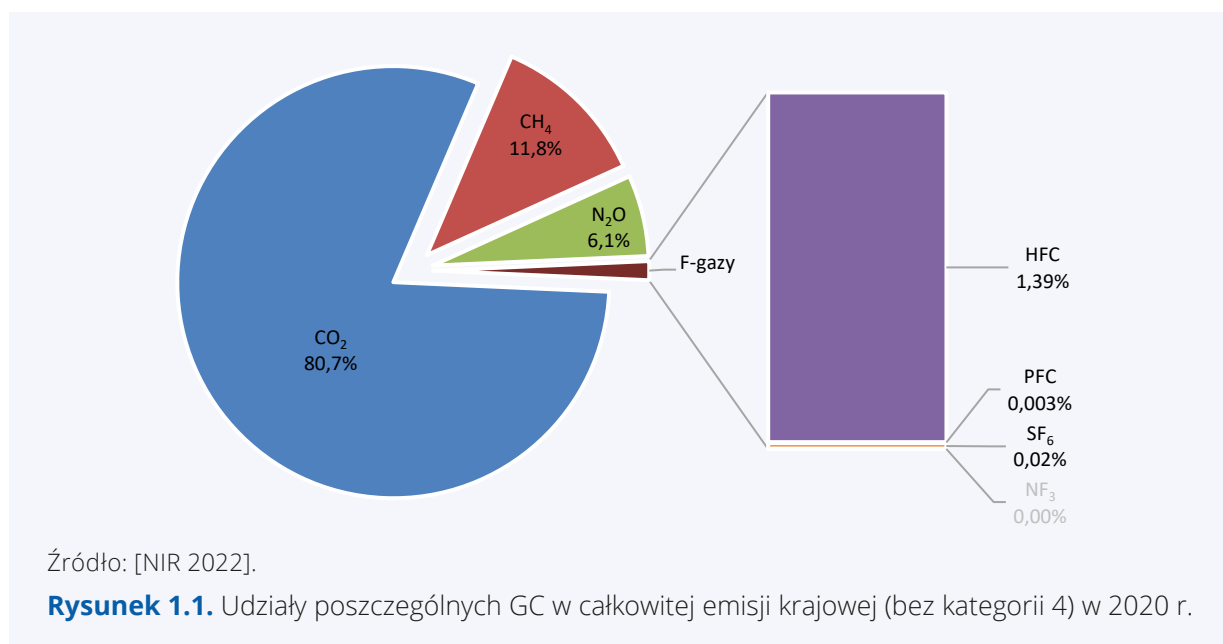
■ Emisja i pochłanianie gazów cieplarnianych w 2020 r.

Całkowita wstępna krajowa emisja gazów cieplarnianych w 2020 r. wyniosła 376,04 mln t. ekw. CO₂ [EIONET CDR 2022], wyłączając emisję i pochłanianie gazów cieplarnianych z kategorii 4. Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo (LULUCF). W porównaniu z rokiem bazowym¹ wielkość emisji za 2020 r. zmniejszyła się o 35,1%.

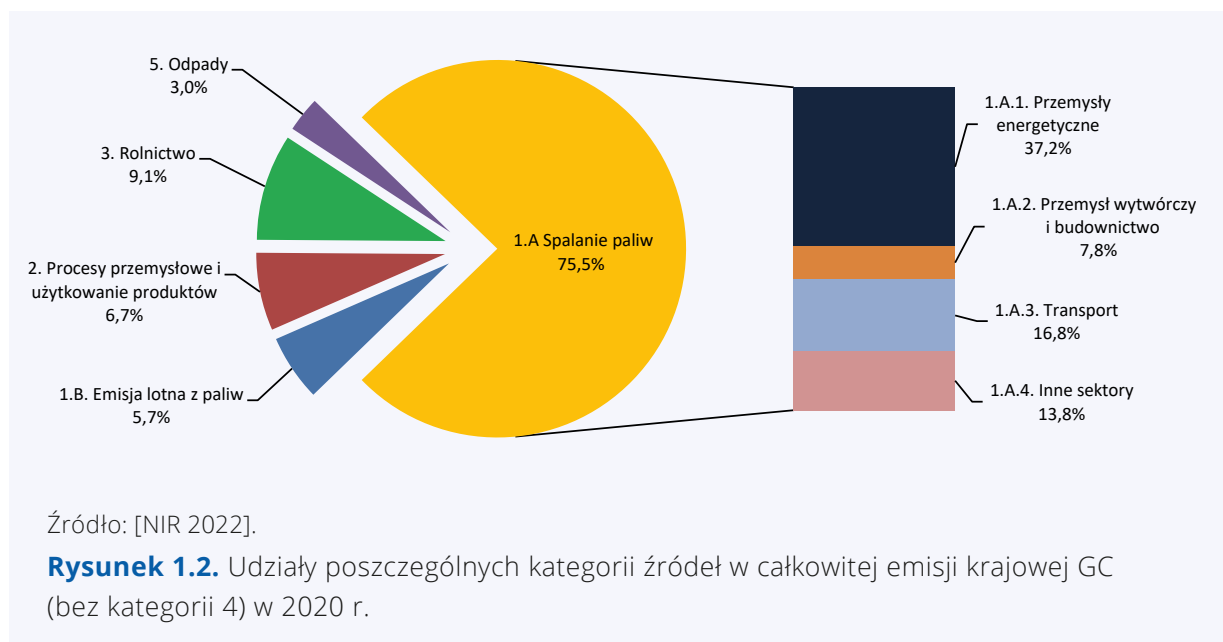
Dominującą rolę w emisji krajowej odgrywa dwutlenek węgla (80,7%). Udział metanu i podtlenku azotu jest znacznie mniejszy i wynosi odpowiednio: 11,8 i 6,1%. Fluorowane gazy przemysłowe (tzw. F-gazy) mają niewielki udział w krajowej emisji GC (łącznie ok. 1,4%), przy czym w Polsce nie odnotowano emisji NF₃ (**rysunek 1.1**).

We wszystkich kategoriach źródeł zanotowano spadek emisji w stosunku do roku bazowego. Największy spadek w emisji GC zanotowano w kategoriach: 5. Odpady i 3. Rolnictwo (odpowiednio o 48,2 i 31,6%). W sektorze 5. było to spowodowane rozwojem technologii składowania odpadów (w wyniku którego w 2020 r. poprzez składowanie zutyliczowano 32% masy odpadów w stosunku do roku bazowego) oraz rozwojem recyklingu i termicznej utylizacji odpadów. Natomiast tak znaczący spadek emisji w rolnictwie spowodowany był zmianami strukturalnymi i ekonomicznymi po 1989 r., w tym zmniejszeniem produkcji zwierzęcej i roślinnej (np. nastąpił spadek pogłowia bydła w latach 1988-2020 z ponad 10 mln szt. do ok. 6 mln, owiec z ponad 4 mln szt. do ok. 288 tys.).

¹ rok bazowy – zgodnie z zapisami artykułu 4.6 konwencji UNFCCC oraz decyzji 9/CP.2 Polska stosuje rok 1988 jako bazowy we wdrażaniu zobowiązań dla następujących gazów cieplarnianych: dwutlenek węgla, metan i podtlenek azotu. Dla następujących grup gazów: HFCs, PFCs oraz sześćfluorku siarki (SF₆) przyjęto rok 1995 jako bazowy, natomiast dla trójfluorku azotu (NF₃) – rok 2000.



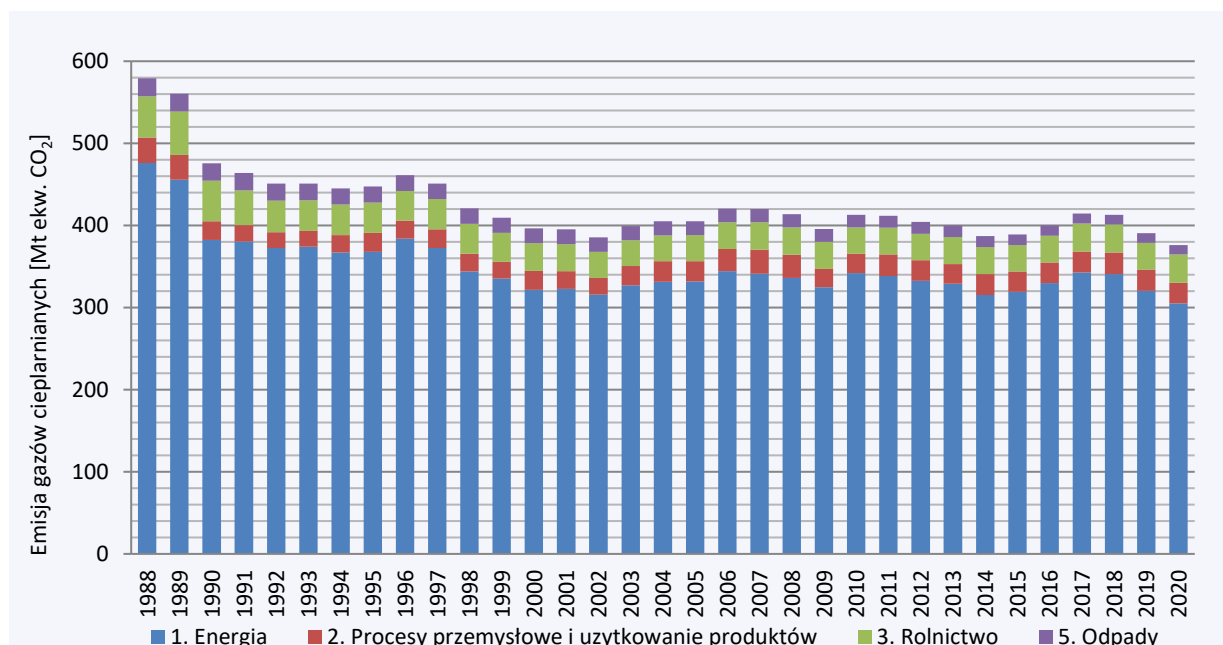
Największy udział w całkowitej emisji gazów cieplarnianych (wyrażonej w ekwiwalencie CO₂) w Polsce w 2020 r. (bez sektora LULUCF) miał sektor 1. Energia (ok. 81,2%), a w ramach tego sektora – procesy spalania paliw (75,5%). Rolnictwo było odpowiedzialne za 9,1%, procesy przemysłowe za 6,7% i odpady za 3,0% (**rysunek 1.2**).



Największy spadek zagregowanej emisji gazów cieplarnianych nastąpił pomiędzy 1988 i 1990 r. i był spowodowany istotnymi zmianami w polskiej gospodarce, szczególnie w przemyśle ciężkim. Sytuacja ta była wynikiem rozpoczętej transformacji politycznej i przechodzenia od gospodarki centralnie sterowanej do wolnorynkowej. Znaczący spadek emisji trwał do 1992 r., po czym, w wyniku wzrostu gospodarczego, emisje zaczęły lekko rosnąć, osiągając maksimum w 1996 r. Kolejne lata

charakteryzował powolny spadek emisji aż do 2002 r., któremu towarzyszyły programy i działania na rzecz efektywnego wykorzystania energii, po czym nastąpił lekki wzrost emisji trwający do 2007 r. a stymulowany ożywionym rozwojem ekonomicznym. W latach 2008–2011 emisja gazów cieplarnianych nieznacznie się zmieniała, poza 2009 r., w którym nastąpił wyraźny jej spadek, spowodowany światową recesją gospodarczą. Po zmniejszeniu emisji w latach 2012–2014 r. emisja gazów cieplarnianych w Polsce zaczęła lekko rosnąć w efekcie ożywienia gospodarczego (**rysunek 1.3**).

Na wzrost emisji gazów cieplarnianych w latach 2016–2018, poza koniunkturą gospodarczą, istotny wpływ miał wzrost zużycia paliw w sektorze transportu drogowego będący efektem m.in. skutecznej walki z szarą strefą na rynku paliw płynnych zapoczątkowaną w 2016 r., a także wzrostem pracy przewozowej związanej z dynamicznym rozwojem gospodarczym. Po 2018 r. jest odnotowywany spadek krajowej emisji GC – o 5% w 2019 r. i o dalsze 4% w 2020 r. w stosunku do roku poprzedniego. Główną przyczyną spadku emisji w 2020 r., który był pierwszym rokiem pandemii COVID-19, było niższe zużycie paliw spalanych w źródłach stacjonarnych (węgla kamiennego o ponad 6% i brunatnego o ponad 8%) oraz w transporcie (benzyny o blisko 7% i oleju napędowego o blisko 3%). Poza sektorem energii obniżyła się także emisja w sektorze procesów przemysłowych, przede wszystkim z powodu spadku produkcji w branży hutniczej (obniżenie produkcji stali konwertorowej o 20%, surowki żelaza o ponad 18% i spieku o ok. 24%). W 2020 r. niższa była również produkcja wapna o ponad 5% w stosunku do 2019 r. Spadek emisji odnotowano także w sektorze odpadów, gdzie zmniejszyła się ilość odpadów komunalnych utylizowanych przez składowanie (o blisko 5%) oraz odpadów komunalnych utylizowanych termicznie bez odzysku energii (o prawie 22%) [NIR 2022].



Źródło: [NIR 2022].

Rysunek 1.3. Zagregowane emisje gazów cieplarnianych (bez kategorii 4) w latach 1988-2020 według kategorii źródeł

■ Emisja a cele redukcyjne

W pierwszym okresie zobowiązań wynikających z ratyfikacji przez Polskę Protokołu z Kioto Polska podjęła się zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych w latach 2008–2012 o 6% w stosunku do emisji w roku bazowym, przy czym wykonała cel redukcyjny ze znaczącą nadwyżką. Natomiast w drugim okresie zobowiązań określonym w Poprawce dauhańskiej [Oświadczenie 2021], w latach 2013–2020, Unia Europejska, jej państwa członkowskie oraz Islandia zawarły porozumienie o wspólnym wypełnieniu celu redukcyjnego w odniesieniu do roku bazowego. Wspólny cel redukcyjny został wyrażony jako zobowiązanie do osiągnięcia średniorocznych emisji na poziomie 80% sumy emisji wszystkich państw w latach bazowych.

Wspólne wypełnianie przez Unię Europejską zobowiązań redukcyjnych w latach 2013-2020 oparte jest na wewnętrznej legislacji unijnej, tzw. pakiecie klimatyczno-energetycznym, która dzieli źródła emisji na dwa główne obszary: unijny system handlu uprawnieniami do emisji (tzw. EU ETS) i sektory nieobjęte systemem EU ETS (tzw. non-ETS).

Polska, podobnie jak inne państwa UE, nie posiada krajowego celu redukcyjnego na lata 2013-2020 nałożonego na emisje pochodzące ze źródeł objętych EU ETS ponieważ limit na te emisje nałożony jest na poziomie całego systemu, zaś emisje w ramach tego limitu są rozliczane bezpośrednio przez prowadzących instalacje. Emisje z pozostałej części źródeł (w tym także emisje pozostałych GC ze źródeł objętych EU ETS) są wliczane do tzw. obszaru non-ETS.

EU ETS – unijny system handlu uprawnieniami do emisji

Handel uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych to jeden z mechanizmów Protokołu z Kioto mający na celu wspomaganie krajów w osiągnięciu zgodności z podjętymi zobowiązaniami do redukcji emisji. Umożliwienie przedsiębiorstwom uczestniczącym w operacji dokonywania kupna lub sprzedaży uprawnień do emisji miało na celu osiągnięcie zakładanych celów możliwie najniższymi kosztami. Unijny system ETS został wdrożony już w 2005 r. Obecnie podmioty gospodarcze, których działalność prowadzona jest na terenie Polski i wiąże się z emisją CO₂, a które spełniają kryteria określone w Ustawie z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (Dz.U. z 2021 r. poz. 332 z późn. zm.), są zobligowane do udziału w systemie handlu uprawnieniami do emisji.

Uczestnikami systemu są głównie duże instalacje przemysłu energetycznego i ciepłowniczego oraz inne instalacje przemysłowe, takie jak: rafinerie ropy naftowej, piece koksownicze, instalacje prażenia lub spiekania rud metali i wytopu surówki żelaza, instalacje do produkcji klinkieru cementowego, wyrobów ceramicznych, wapna, szkła, papieru czy masy włóknistej z drewna.

Udział emisji z instalacji objętych systemem EU ETS w całkowitej emisji krajowej w Polsce w okresie 2005–2020 wyniósł średnio ok. 50% i zmieniał się od 52,5% w 2013 r. do 45,6% w 2020 r. Należy przy tym zwrócić uwagę, że od 2013 r. zakres EU ETS rozszerzył się na nowe rodzaje działalności (np. produkcja kwasu azotowego) i gazy cieplarniane (podtlenek azotu).

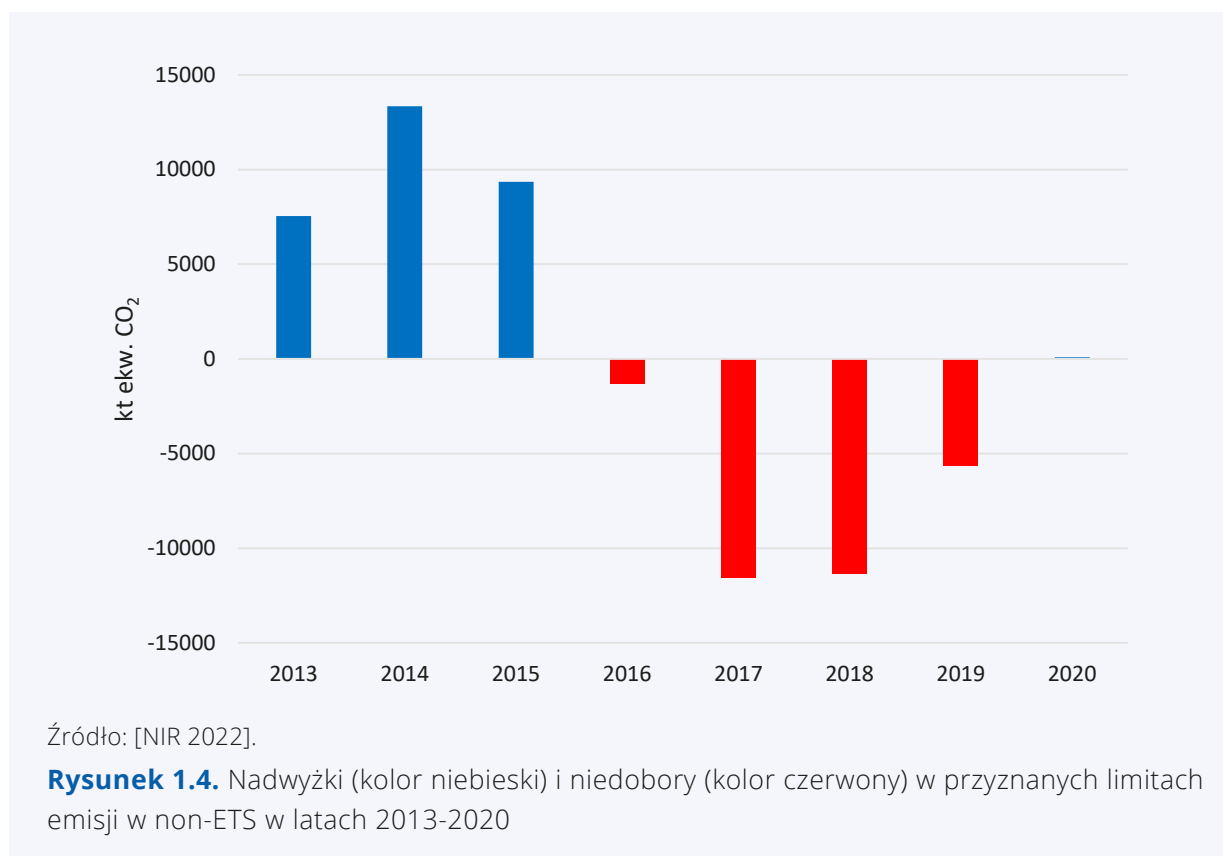
Emisja gazów cieplarnianych z tej części źródeł, które są objęte EU ETS (energetyka i ciepłownictwo, zakłady przemysłowe), jest raportowana bezpośrednio przez prowadzących instalacje do KOBiZE. Suma emisji określonej we wszystkich raportach składanych co roku w Polsce stanowi emisję polskiej części unijnego sektora EU ETS. Emisja z sektorów objętych EU ETS w 2020 r. wyniosła 171,73 mln t ekw. CO₂ i była niższa o 6,5% od emisji w 2019 r. i o 16,5% od emisji w 2013 r. [NIR 2022].

Sektory nieobjęte systemem EU ETS

Emisja z sektorów nieobjętych EU ETS (non-ETS) jest raportowana i rozliczana przez poszczególne państwa członkowskie UE indywidualnie zgodnie z Decyzją Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2009/406/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie wysiłków podjętych przez państwa członkowskie zmierzających do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych w celu realizacji do roku 2020 zobowiązań Wspólnoty dotyczących redukcji emisji gazów cieplarnianych (tzw. Decyzja ESD). W ramach Decyzji ESD Polska miała obowiązek ograniczyć wzrost emisji GC do 14% w 2020 r. w stosunku do 2005 r. W tym celu przyjęto decyzję nr 2013/162/WE określającą roczne limity emisji (Annual Emission Allocations – AEA) dla państw członkowskich na lata 2013–2020, która została zaktualizowana Decyzją Komisji (UE) 2017/1471 zmieniającą decyzję 2013/162/UE w celu skorygowania rocznych limitów emisji państw członkowskich na okres od 2017 r. do 2020 r., a także Decyzję nr 2013/634/WE dotyczącą korekty ww. limitów emisji.

Non-ETS jest rozumiany jako część krajowych emisji gazów cieplarnianych, które nie są objęte systemem handlu uprawnieniami do emisji. Emisje nieobjęte ETS obejmują następujące sektory: rolnictwo, odpady, emisje przemysłowe poza EU ETS oraz spalanie paliw w transporcie, sektorze komunalnym i mieszkaniowym obejmującym gospodarstwa domowe, usługi, instytucje itp.

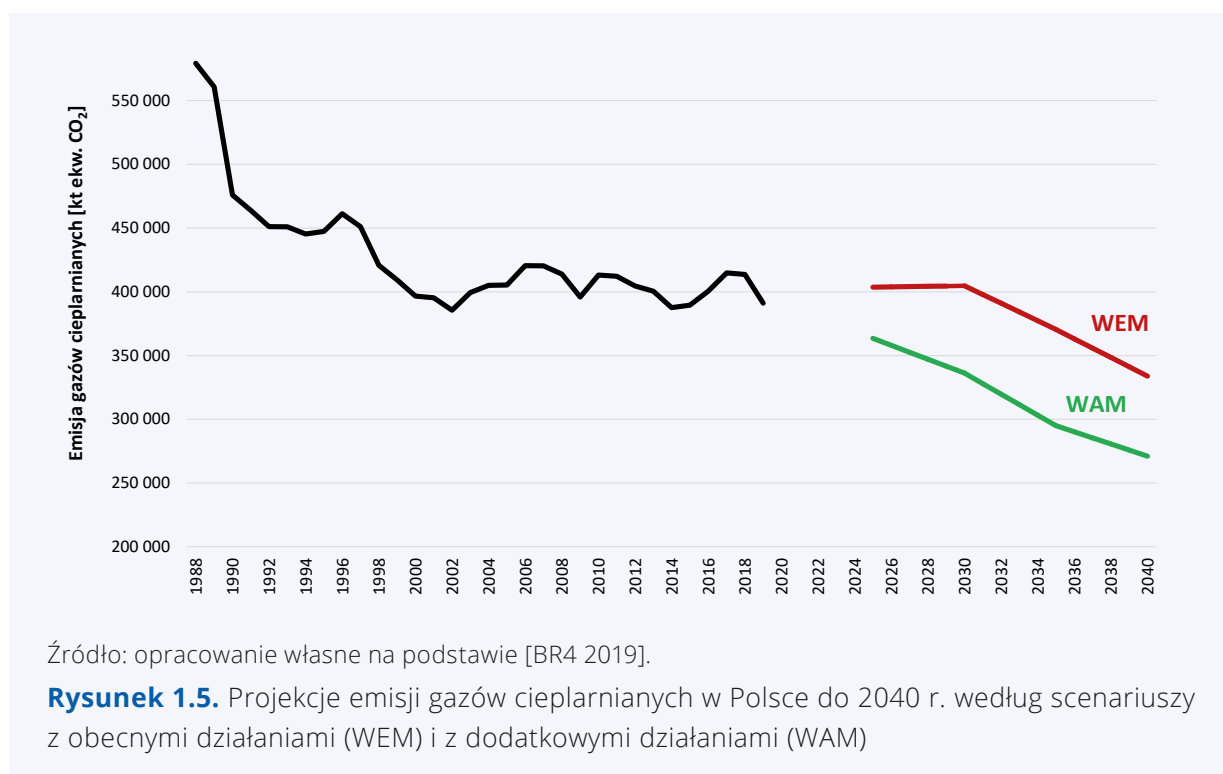
Porównanie emisji w sektorach nieobjętych EU ETS w latach 2013–2020 wykazało, że w trzech pierwszych latach tego okresu emisje były niższe od przyznaných limitów emisji (**rysunek 1.4**). Niestety w kolejnych czterech latach emisje krajowe przekroczyły limity, jednakże możliwość skumulowania wcześniejszej nadwyżki przyznaných emisji pozwoliła Polsce rozliczyć cały okres 2013–2019 na niewielkim plusie. Z kolei emisja w non-ETS w 2020 r. wyniosła 205,093 mln t ekw. CO₂, a zatem była niższa od limitu przyznanego Polsce zgodnie z Decyzją 2009/406/WE na ten rok (205,181 mln t ekw. CO₂). Oznacza to, że łącznie w całym okresie 2013–2020 Polska wypełniła swój cel redukcyjny w sektorach non-ETS z niewielką nadwyżką wynoszącą 0,545 mln t ekw. CO₂ [NIR 2022].



Podsumowanie

Według ostatnich projekcji emisji gazów cieplarnianych opracowanych w KOBiZE dla dwóch scenariuszy: z obecnymi działaniami (tzw. WEM) oraz z dodatkowymi działaniami (tzw. WAM) na potrzeby Czwartego raportu dwuletniego [BR4 2019] prognozuje się, że według scenariusza WEM redukcja emisji GC w latach 1990-2030 wyniesie 15%, natomiast w scenariuszu WAM – 29%. Jednocześnie redukcja emisji gazów cieplarnianych w latach 1990-2040 osiągnie 30% według WEM i 43% w scenariuszu WAM [BR4 2019] (**rysunek 1.5**). Przedstawione projekcje nie uwzględniały jeszcze skutków pandemii COVID-19, która rozpoczęła się w 2020 r.

Informacje gromadzone w krajowym systemie bilansowania i raportowania emisji gazów cieplarnianych potwierdzają fakt, że dotychczasowe wysiłki Polski zmierzające do ograniczania emisji tych gazów przynoszą efekty w postaci znacznych redukcji. Polska wywiązuje się z nałożonych zobowiązań redukcyjnych, w tym w zakresie źródeł nieobjętych ETS. Jednak ambitna polityka międzynarodowa z pewnością będzie wymagała podejmowania kolejnych działań na poziomie kraju, które pozwolą na spełnienie nowych, obecnie definiowanych przez UE (m.in. w ramach pakietu Fit for 55) celów redukcyjnych.



Literatura:

BR4 2019. Czwarty raport dwuletni dla Konferencji Stron Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu. Ministerstwo Klimatu. Warszawa, grudzień 2019.

EIONET CDR. <https://cdr.eionet.europa.eu/> (dostęp w dn.: 2023-01-17).

EIONET CDR 2022. https://cdr.eionet.europa.eu/pl/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyo86ig/ (dostęp w dn.: 2023-01-17).

NIR 2022. Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022. Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2020. Raport syntetyczny – wykonany na potrzeby Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto. Bebkiewicz K., Boryń E., Chłopek Z., Doberska A., Kargulewicz I., Olecka A., Rutkowski J., Skośkiewicz J., Szczepański K., Wałęzak M., Waśniewska S., Zimakowska–Laskowska M., Żaczek M., Mzyk P., Paczosa A. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) – Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa, maj 2022.

Oświadczenie 2021. Oświadczenie Rządowe z dnia 26 marca 2021 r. w sprawie mocy obowiązującej Poprawki dauhańskiej do Protokołu z Kioto do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzonego w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r., sporządzonej w Ad-Dausze dnia 8 grudnia 2012 r. (Dz.U. z dn. 21 maja 2021 r. poz. 948).

Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (Dz.U. 1996 nr 53 poz. 238).

Rozporządzenie 2013. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 525/2013 z dnia 21 maja 2013 r. w sprawie mechanizmu monitorowania i sprawozdawczości w zakresie emisji gazów cieplarnianych oraz zgłaszania innych informacji na poziomie krajowym i unijnym, mających znaczenie dla zmiany klimatu, oraz uchylające decyzję nr 280/2004/WE.

Ustawa z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (Dz.U. z 2021 r. poz. 332 z późn. zm.).

Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz.U. z 2020 r. poz. 1077 z późn. zm.).

Rozdział 2

Monitoring i identyfikacja źródeł gazów cieplarnianych na obszarach miejskich

dr hab. inż. Izabela Sówka

prof. uczelni, dr inż. Yaroslav Bezyk

Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska,
Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska

Wstęp

Atmosfera jest najlepiej wymieszanym i najszybciej wymieniającym się magazynem węgla (C) w porównaniu z innymi jego głównymi rezerwuarami. Objętościowo suche powietrze zawiera głównie trzy podstawowe gazy: azot (78,084%), tlen (20,946%) i argon (0,934%) oraz dwutlenek węgla (0,04%), metan (0,0002%), podtlenek azotu (0,00003%) i inne gazy śladowe (0,003%) [Nakazawa 2020]. Aktywne gazy radiacyjnie, takie jak: dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), tlenek węgla (CO), chlorofluorowęglowodory (CFC), podtlenek azotu (NO_2), tlenek azotu (NO) i para wodna (H_2O) są uważane za gazy cieplarniane (GHG) [Karl i Trenberth 2003]. Gazy te mają zdolność pochłaniania i zatrzymywania ciepła (w postaci promieniowania podczerwonego i długofalowego) w atmosferze i przyczyniają się do powstawania efektu cieplarnianego.

Problem zanieczyszczenia powietrza jest ściśle związany z kwestią zmiany klimatu [ONZ, 2022, IASS, 2022]. Emisja zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych do powietrza może powodować bezpośrednie lub pośrednie skutki dla klimatu. Powszechne zanieczyszczenia powietrza (np. sadza jako składnik PM (Particulate Matter – pył zawieszony)) lub wtórne (np. aerozole siarczanowe i ozon w warstwie przyziemnej) oddziałują fizycznie i chemicznie w atmosferze i mogą wpływać na bilans energetyczny Ziemi (pochłaniają i odbijają wpadające światło słoneczne) [EPA 2022; EPA 2022]. Najpowszechniejsze gazy cieplarniane, w szczególności dwutlenek węgla, metan, podtlenek azotu i inne syntetyczne

substancje chemiczne, są głównymi czynnikami powodującymi globalne ocieplenie i mają bezpośredni negatywny wpływ na klimat [Friedlingstein i in. 2020; Saunio i in. 2020]. Ponadto metan jest silniejszy niż dwutlenek węgla i ma pośredni wpływ na stężenia tła ozonu w warstwie przyziemnej [Van Dingenen i in. 2018]. Wiele badań wskazuje, że para wodna, ozon troposferyczny, cząstki stałe (aerozole) oraz ich główne składniki i prekursorzy (np. tlenek węgla, tlenki azotu i lotne związki organiczne) również wzmacniają wpływ na ocieplenie gazów cieplarnianych [Fry i in. 2014; IPCC 2006; Zhang 2020; Ebi i McGregor 2008].

Obszary miast są uważane za jedno z ważnych źródeł, na których emisje gazów cieplarnianych są znaczące [Brondizio i in. 2015; Sówka i Bezyk 2018]. To właśnie na terenach miast podejmuje się istotne działania na rzecz ochrony klimatu [Candy i in. 2017; Schröpfer i Menz 2019]. Oszacowanie miejskiego budżetu węgla (C) wymaga skupienia uwagi ze względu na złożoność cyklu C – tego typu obliczenia wykazują większą liczbę potencjalnych niepewności niż w przypadku szerszej rozdzielczości przestrzennej. Wpływ kilku współdziałających czynników na wielkość emisji antropogenicznych i naturalnych jest często trudny do oszacowania i ujęcia w całkowitym cyklu węglowym obszarów miejskich [Ward i in. 2015; Schröpfer i Menz 2019; Mbow i in. 2017]. Ponadto zdolność do dokładnego określenia udziału źródeł antropogenicznych i naturalnych w emisji i absorpcji w skali lokalnej/miejskiej jest również ograniczona ze względu na względnie małą sieć monitoringu gazów cieplarnianych w Polsce.

Na jakość powietrza wpływa wiele czynników, co wymaga ciągłego monitorowania emisji lub bezpośrednich pomiarów w czasie rzeczywistym właściwości fizycznych i chemicznych oraz ilości określonych zanieczyszczeń. W wielu krajach poziomy zanieczyszczeń powietrza w określonym czasie są mierzone głównie w ramach sieci monitoringu jakości powietrza. Ogólnie rzecz biorąc, system monitoringu powietrza atmosferycznego zapewnia systematyczną, długoterminową ocenę zanieczyszczeń przy użyciu różnych metod i technik, zależnych m.in. od rodzaju automatycznej stacji pomiarowej i warunków lokalnych w interesującym nas miejscu [Oleniacz i Gorzelnik 2021]. W systemie analitycznym monitoringu zanieczyszczeń powietrza znajdują się stacje monitoringu, które w sposób ciągły monitorują szeroki zakres zanieczyszczeń związanych m.in. z ruchem drogowym, a także stacje tła właściwego dla danego regionu oraz stacje przemysłowe zlokalizowane w zasięgu oddziaływania źródeł emisji [CloIP 2022]. Dodatkowy monitoring na platformach mobilnych może uzupełniać dane pochodzące ze stacjonarnych stacji pomiarowych i umożliwiać scharakteryzowanie przestrzenno-czasowych rozkładów zanieczyszczenia powietrza oraz identyfikację źródeł emisji [Solomon i in. 2020].

■ Obieg węgla w środowisku miejskim

Na obszarach miejskich węgiel może być uwalniany z różnych źródeł i procesów biogenicznych, w tym takich jak: respiracja roślin i gleby (autotroficzne i heterotroficzne), oddychanie człowieka, a także z działalności antropogenicznej, z procesów: spalania paliw kopalnych (stałych, np. w gospodarstwach domowych i płynnych, np. w transporcie), przemysłowych, gospodarki odpadami, rozwoju

miast itp. [Churkina 2016; Gately i Hutrya 2017]. Autotroficzne oddychanie roślinności lądowej oraz heterotroficzne oddychanie podziemnych grzybów glebowych, bakterii, mikroorganizmów i fauny, a także oddychanie zwierząt i ludzi stanowi część metabolizmu organizmów żywych [Cai i in. 2018; Churkina 2016]. W wyniku rozkładu materii organicznej w glebie, np. podczas procesów degradacji i dyfuzji, powszechnie mierzonych jako tempo oddychania, CO_2 i CH_4 powstają jako produkty uboczne chemicznego rozkładu resztek roślinnych i zwierzęcych [Bahn i in. 2009].

Dwutlenek węgla uwalniany ze spalania paliw kopalnych w gospodarstwach domowych i budynkach użyteczności publicznej, transporcie, produkcji i przemyśle jest najbardziej krytycznym składnikiem miejskiego budżetu węglowego. Zmiany w zapotrzebowaniu na energię i ciepło w punktach końcowych użytkowników, w budynkach mieszkalnych o dużej gęstości, sieciach transportowych, działalności przemysłowej oraz gospodarce odpadami i recyklingu zmieniają strumienie węgla na styku powierzchni ziemi i atmosfery. Szybka urbanizacja może również powodować zmiany w strumieniach ilościowym i jakościowym żywności na poziomie gospodarstwa domowego, co z kolei wpływa na zmianę systemu rolniczego i wzrost emisji z sektora odpadów.

Ekosystemy miejskie (parki miejskie, rozproszone drzewa, trawniki) mają duży potencjał asymilacji CO_2 dzięki biologicznym procesom fotosyntezy oraz dodatkowemu poborowi z gleby. W prowadzonych badaniach stwierdzono między innymi, że usuwanie CO_2 z atmosfery poprzez fotosyntezę w ciągu dnia stanowi ujemny strumień C, natomiast w nocy oddychanie roślin powoduje dodatni strumień C [Ward i in. 2015]. Dienne i sezonowe antropogeniczne wpływy na wielkość strumieni (emisji) CO_2 w mieście różnią się w zależności od działalności człowieka – zużycia paliwa w pojazdach oraz ogrzewania i chłodzenia budynków mieszkalnych.

Ilość węgla zakumulowanego w terenie miejskim zależy od morfologii miasta, materiałów użytych do budowy, interakcji warunków klimatycznych, gleby, roślinności i cyklu hydrologicznego [Churkina 2016]. Za główne czynniki wpływające na interakcje w układzie atmosfera – wegetacja – gleba uznaje się: temperaturę powietrza, zawartość wody w glebie, depozycję azotu, promieniowanie słoneczne, poziom atmosferycznego CO_2 oraz stężenie ozonu w troposferze. Wyzwania związane z urbanizacją, w szczególności podwyższona temperatura (przejawiająca się w zjawisku tzw. miejskiej „wyspy ciepła”), ekstremalne zjawiska pogodowe i klimatyczne, zmiany w użytkowaniu gruntów oraz równowaga promieniowania powierzchniowego, pary wodnej i nawadniania, zwiększony poziom CO_2 , transport zanieczyszczeń, wpływają na wszystkie kluczowe procesy biologiczne (w tym fotosyntezy i oddychania) w ekosystemach miejskich [Schröpfer i Menz 2019].

Metody pomiarów i badań

Do pomiaru stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze można wykorzystać kilka rodzajów obserwacji i pomiarów, w tym takich jak: pomiary terenowe, pobieranie próbek podczas lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi, naziemne techniki teledetekcyjne oraz teledetekcja kosmiczna [Brand i in. 2016; Keppel-Aleks i in. 2011; Hollenbeck i in. 2021]. W większości naziemnych obserwacji

gazów śladowych (stacje, wieże, punkty poboru próbek powietrza z pomiarami systemami GC-IRMS i technikami CRDS) stosuje się pobór próbek metodą izolacyjną, a analiza izotopowa opiera się głównie na pomiarach chwilowych pobranych próbek powietrza [Guo i in. 2021; Richardson i in. 2012; Wang i in. 2013]. W ostatnich latach do określenia udziału źródeł CO₂ i CH₄ znalazły zastosowanie m.in. techniki spektroskopowe do analizy izotopów trwałych, w tym wymienić należy: spektrometrię masową stosunku izotopów (IRMS), spektroskopię absorpcyjną z przestrajalnym (regulowanym) laserem diodowym (TDLAS), spektroskopię absorpcyjną z laserem kaskadowym (QCLAS), niedispersyjną spektroskopię w podczerwieni (NDIR), spektroskopię strat we wnęce optycznej (CRDS) oraz spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) [Flores i in. 2017; Brewer i in. 2019].

Techniką przydatną w badaniach umożliwiających określenie lokalnych miejskich źródeł zanieczyszczeń uwzględniających wpływ aktywności człowieka na środowisko miejskie jest metoda składu izotopowego. Pomiary względnych zawartości naturalnie występujących trwałych izotopów węgla (¹²C i ¹³C) w CO₂, CH₄ umożliwiają określenie udziału źródeł emisji w atmosferze [Liang i in. 2016; Midani i in. 2017; Pataki i in. 2005]. Stosuje się je w szczególności do badania procesów przyczyniających się do wzmożonej emisji, jak również do określania dominujących antropogenicznych źródeł CO₂ i CH₄ w atmosferze miejskiej (np. ruch drogowy, ciepłownictwo, przemysł) [Górka i Lewicka-Szczebak 2013; Górka i in. 2011; Moore i in. 2015]. Ponadto analizy stosunków trwałych izotopów węgla umożliwiają identyfikację głównych biogenicznych źródeł/pochłaniaczy (roślinność i gleba) dwutlenku węgla i metanu [Zimnoch i in. 2018; Jasek i in. 2014; Zazzeri i in. 2017].

Ocena stosunków trwałych izotopów węgla ($\delta^{13}\text{C}$) umożliwia analizę czasowej i przestrzennej zmienności obserwowanych strumieni z różnych źródeł naturalnych: procesów zachodzących w ekosystemach nad- i pod ziemią (oddychanie gleby i roślin), procesów fotosyntezy w roślinach, wielkości oddychania autotroficznego przyczyniającego się do całkowitego oddychania gleby, pochłaniaczy węgla w glebie i roślinności [Flanagan i Ehleringer 1998; Zajac i in. 2018]. Obliczenie sygnatur izotopowych węgla CO₂ i CH₄ może umożliwić identyfikację emisji pochodzących z działalności człowieka, która jest związana zarówno ze składem pierwotnym (źródłem gazów), jak i procesami frakcjonowania (separacji składników mieszaniny). Różne rodzaje paliw mają bowiem różny skład trwałych izotopów węgla, co jest związane ze sposobem ich powstawania. Określenie unikalnych sygnatur izotopowych emitowanych ze źródeł emisji położonych na obszarach miejskich umożliwia obliczenie strumieni dwutlenku węgla (CO₂) i metanu (CH₄) z ich terenów oraz ilościowe określenie udziału składowej antropogenicznej w całkowitej emisji gazów cieplarnianych [Zimnoch i in. 2018; Jasek i in. 2014; Zazzeri i in. 2017].

Tradycyjnie pomiary trwałych izotopów dla pobranych próbek gazów są wykonywane przy zastosowaniu spektrometrów IRMS, które są uznawane za dokładne i precyzyjne narzędzia przy zastosowaniu nawet najmniejszych ilości próby [Wagner i in. 2018]. IRMS pozwala na analizę stosunków izotopów trwałych w materiałach naturalnych lub syntetycznych [Kaur i in. 2007]. Jednak technika IRMS nie jest zazwyczaj wykorzystywana do ciągłej analizy w warunkach terenowych, bo jest kosztowna. Natomiast rozwój spektroskopii CRDS pozwala na prowadzenie w czasie rzeczywistym,

w wysokiej rozdzielczości, dokładnych pomiarów stosunku izotopów CO_2 i CH_4 [Jackson i in. 2014; Bezyk i in. 2022; Bezyk i in. 2021]. CRDS różni się od innych technik tym, że pozwala w sposób bezpośredni na analizy widma absorpcyjnego gazu na podstawie pomiaru w czasie [Picarro 2022]. Spektroskopia z pierścieniem wnęki jest formą laserowej spektroskopii absorpcyjnej, która charakteryzuje się wysoką czułością i precyzją. CRDS wykorzystuje koherentne źródło światła laserowego do generowania fotonów – przez nowy typ ogniwa optycznego z trzema silnie odbijającymi lustrami. Charakteryzuje się ona znacznie większą długością ścieżki optycznej niż inne techniki (np. TDLAS) [Picarro 2022]. Spektroskopia CRDS jest dokładną techniką absorpcji laserowej, która staje się coraz bardziej powszechna w analizie gazów śladowych w różnego rodzaju badaniach empirycznych.

Pomiary *in-situ* strumieni gazów cieplarnianych z nad różnych źródeł emisji (np. produkcja energii, rolnictwo, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów, biogazownie i wykrywanie wycieków wzdłuż gazociągów) mogą być wykonywane za pomocą statycznych/zautomatyzowanych próbników komorowych, stacji naziemnych (np. technika kowariancji wirów, stacje pomiarów atmosferycznych), systemu próbników na ruchomych platformach oraz przy zastosowaniu technologii bezzałogowych statków powietrznych (UAV) [Gålfalk i in. 2021; Hollenbeck i in. 2021; Vergote i in. 2020; Andersen i in. 2021; Vinković i in. 2022]. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, nazywanych powszechnie dronami, znajduje coraz szersze zastosowanie w monitorowaniu gazów i analiz o wysokich rozdzielczościach przestrzennych i czasowych. UAV wyposażone w kilka pokładowych czujników o niewielkiej masie mogą być wykorzystywane do bezpośrednich pomiarów ułamków molowych CO_2 , CH_4 w atmosferze [Hollenbeck i in. 2021; Andersen i in. 2018; Li i in. 2020; Chang i in. 2018]. Powietrzny system pomiarowy pozwala na instalację modułu pomiaru parametrów meteorologicznych (np. poprzez zamontowanie anemometru sonicznego uzupełnionego o czujniki temperatury, ciśnienia i wilgotności) bez konieczności stosowania stacji meteorologicznej na ziemi [Sekula i in. 2021; Hollenbeck i in. 2021]. Dane o prędkości lotu i położeniu są dokładnie obliczane przez moduł GPS [Gålfalk i in. 2021; Andersen i in. 2021].

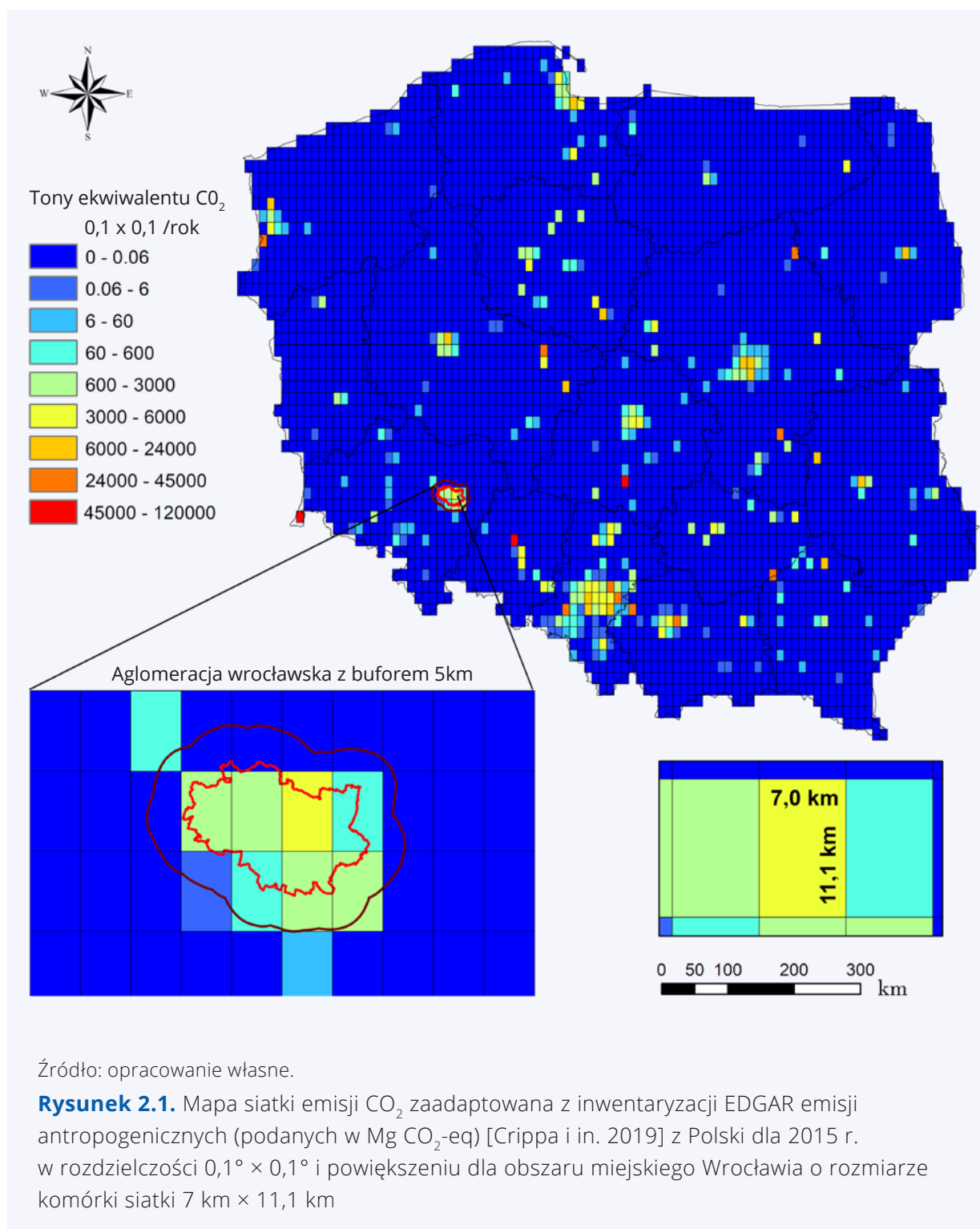
Platforma oparta na dronie z wieloma układami czujnikowymi na pokładzie stanowi uznawaną technikę pomiaru gazów cieplarnianych. W pasywnych układach sensorycznych w małych dronach wykorzystuje się głównie kamery optyczne, w tym: kamery wizualne, kamery termowizyjne, systemy wykrywające podczerwień, np. bliską, krótką, średnią i długą [Hollenbeck i in. 2021; Fjelsted i in. 2019]. Ze względu na ograniczenia ładowności dronów, UAV są wyposażone w aktywne czujniki, które są wystarczająco lekkie dla tych platform. Masa przyrządów na UAV w dużym stopniu zależy od pożądanej charakterystyki czułości i czasu reakcji [Hollenbeck i in. 2021]. Powszechnie stosowane na platformach czujniki aktywne obejmują: spektroskopię absorpcyjną z przestrajalnym (regulowanym) laserem diodowym (TDLAS), niedispersyjną spektroskopię w podczerwieni (NDIR), detektory fotojonizacyjne (PID), czujniki z ceramicznymi tlenkami metali (CMOS) [Hollenbeck i in. 2021; Carrozzo i in. 2018], pokładowe laserowe analizatory gazów średniej podczerwieni [Gålfalk i in. 2021], czujniki elektrochemiczne [Hollenbeck i in. 2021; Sekula i in. 2021], które mogą występować w kilku postaciach dla danej ładowności platformy. Czujniki o wysokiej dokładności i szybkiej reakcji zazwyczaj ważą więcej niż czujniki lekkie. Kompaktowe i lekkie czujniki, takie jak

CMOS, często reagują wolniej i są mniej czułe, co może prowadzić do problemów z integracją tych modułów [Hollenbeck i in. 2021]. Dzięki dalszej optymalizacji wielkości systemu opartego na dronie i jego wydajności poprzez efektywną integrację wszystkich czujników potrzebnych do pomiaru strumieni i warunków meteorologicznych można znacznie zwiększyć czas lotu oraz zasięg przestrzenny i pionowy prowadzonych pomiarów.

Ocena udziału składowej antropogenicznej i biogenicznej CO₂ w atmosferze miejskiej – studium Wrocławia

W zależności od poziomu podejścia do szacowania emisji gazów cieplarnianych wyróżnia się krajowe inwentaryzacje emisji gazów cieplarnianych oraz raportowanie emisji na poziomie regionalnym lub miejskim [Sówka i Bezyk 2018]. Ogólnomiejskie inwentaryzacje emisji CO₂ są często oparte na kombinacji podejścia bottom-up i top-down. Metoda bottom-up polega na raportowaniu emisji z różnych sektorów z wykorzystaniem statystycznych baz danych dotyczących konkretnych działań (produkcja i wykorzystanie paliw kopalnych) pomnożonych przez wskaźniki emisji odpowiadające każdemu procesowi emisji [Turnbull i in. 2016; Ryoo i in. 2018]. Szacunki emisji typu bottom-up słabo jednak reprezentują różnorodne źródła naziemne o dobrze wymieszanych proporcjach emisji (np. stosunek CO₂ i CO) w złożonym terenie miejskim [Cui i in. 2015; Nathan i in. 2018]. Inaczej jest w przypadku metod top-down, ponieważ kwantyfikują one emisje, opierając się na bezpośrednim pomiarze atmosferycznym i badaniu podziału źródeł, w połączeniu z informacjami o transporcie atmosferycznym [Sargent i in. 2018; Bergamaschi i in. 2018]. Podejście top-down daje możliwość weryfikacji emisji w zakresie miejskich antropogenicznych i biogenicznych źródeł CO₂, wymaga jednak dokładnego oddzielenia lokalnych strumieni miejskich od sygnałów regionalnych oraz jasnej konstrukcji lokalnego tła [McKeen i in. 2013; Verhuls i in. 2017]. Zastosowanie obu tych metod, inwentaryzacji bottom-up i podejścia top-down do atmosfery, jest przydatne do zwiększenia pewności szacunków emisji w skali lokalnej [Newman i in. 2016; Nathan i in. 2018].

Baza danych emisji dla globalnych badań atmosfery (EDGAR), wydanie EDGAR v5.0 (szereg czasowy 1970-2015), została wykorzystana do rozważenia wkładu strumienia antropogenicznego. EDGAR jest często wykorzystywany do porównań z szacunkami top-down [Janssens-Maenhout i in. 2019; Cui i in. 2015; Bun i in. 2019]. Obecnie opracowywane szacunki antropogenicznych emisji CO₂ EDGAR według krajów i sektorów są dostarczane z roczną rozdzielczością czasową i przestrzenną 0,1° × 0,1° [Crippa i in. 2019]. EDGAR zawiera również przestrzennie i czasowo gridowane mapy emisji pochodzących z różnych sektorów antropogenicznych w przedziale czasowym od 1970 do 2015 r. [Crippa i in. 2019]. Na **rysunku 2.1** przedstawiono mapę emisji CO₂ (zarówno z węgla długo-, jak i krótkocyklicznego, biogenego) o rozdzielczości przestrzennej 0,1° × 0,1° dla obszaru Polski dla 2015 r. Całkowitą roczną emisję CO₂ w 2015 r., pobraną z EDGAR dla obszaru Polski, oszacowano na 352,28 Mt [Crippa i in. 2019].



Na mapie EDGAR emisji CO₂ są wyraźnie przedstawione punkty związane z procesami spalania paliw kopalnych w całej Polsce, widoczne szczególnie w obszarach miejskich. Korzystając z inwentaryzacji emisji CO₂ EDGAR dla Polski za 2015 r., wyodrębniono 7-pikselowy kwadrat pokrywający się z obszarem miejskim Wrocławia w celu określenia średniej emisji antropogenicznej z jego obszaru. Następnie 7-pikselowy obszar w obrębie miasta oraz tereny graniczne poza Wrocławiem (czerwony kontur) zostały zagregowane w celu analizy całkowitej emisji paliw kopalnych z wybranych sektorów.

Średnią emisję CO₂ z źródeł antropogenicznych we Wrocławiu (na terenie miasta i okolic) oszacowano na ok. 3939,84 kt, co jest wartością o 4,23% niższą od obliczonej przez lokalną inwentaryzację w 2013 r. W 7 komórkach siatki – miasto całkowita inwentaryzacja CO₂ podana przez EDGAR dla 2015 r. obejmowała 2418,53 kt CO₂ z sektora energetycznego (IPCC 1A1a, 1A4) lub około 61,1%, 410,21 kt CO₂ z procesów przemysłowych (IPCC 1B1a, 2B, 2G, 3) lub stanowiło 10,4%, 1103,99 kt CO₂ z sektora transportu (IPCC 1A3a, 1A3b, 1A3c), co stanowiło 28%, 3,24 kt CO₂ z gospodarki odpadami (IPCC 6c), czyli do 0,1%, a pozostałe 3,87 kt z innych pomniejszych źródeł (IPCC 4F, 4C, 4D), czyli około 6%. W porównaniu z lokalnymi szacunkami emisji za 2013 r. inwentaryzacja EDGAR CO₂ za 2015 r. jest 1,1-1,4 razy niższa niż wynik uzyskany na poziomie lokalnym.

Uzyskane wyniki porównano z emisjami ze zużycia paliw kopalnych w 2013 r. określonymi w „Planie Gospodarki Niskoemisyjnej dla Zintegrowanych Inwestycji Terytorialnych na terenie Wrocławskiego Obszaru Funkcjonalnego”. Całkowita emisja GHG z terenu gminy Wrocław w 2013 r. wyniosła 4113,77 kt CO₂-eq, przy średniej emisji 6,52 ton CO₂ na osobę [Plan Gospodarki Niskoemisyjnej 2015]. Według inwentaryzacji wrocławskiej całkowita emisja GHG we Wrocławiu zmniejszyła się o 7,2% (317,1 kt CO₂-eq), głównie dzięki zmniejszonemu zużyciu ciepła sieciowego, spadkowi w sektorze przemysłu, odpadów oraz w sektorze rolnictwa [Sówka i Bezyk 2018].

Zużycie energii, poprzez spalanie paliw kopalnych na cele elektryczne i grzewcze, było głównym źródłem miejskim odpowiedzialnym za 2529,83 kt CO₂ w skali miasta, czyli około 61,5% rocznej antropogenicznej emisji CO₂ (35,4% zużycia energii w sektorze mieszkalnym i 26,1% – w usługach) w 2013 r. [Sówka i Bezyk 2018]. Porównując tę wartość do krajowego poziomu emisji w Polsce, wskaźnik zużycia energii w gospodarstwach domowych i usługach w Polsce mieścił się w przedziale 23-24% całkowitej emisji w kraju w 2013 r. Około 23,7% emisji CO₂ w 2013 r. przypadło na transport, którego udział wzrósł prawie dwukrotnie w stosunku do 1990 r. (z 574,23 do 978,54 kt CO₂-eq), ze względu na wzrost ilości transportu indywidualnego oraz przestarzałą flotę samochodową [Sówka i Bezyk 2018]. Emisja z sektora transportu w krajowej inwentaryzacji dla Polski za 2013 r. mieściła się w przedziale 13-14% [KOBiZE 2019].

Wkład emisji CO₂ z procesów przemysłowych na obszarze miasta w 2013 r. stanowił ok. 596,11 kt CO₂-eq, czyli blisko 14,5%, podczas gdy w skali kraju oszacowano go w przedziale 6-7% [KOBiZE 2019]. W przypadku emisji z przetwarzania odpadów we Wrocławiu nastąpiły znaczne zmiany w stosunku do roku bazowego (1990 r.), głównie ze względu na zróżnicowanie w zarządzaniu składowiskami odpadów komunalnych oraz zastosowanie nowych technologii przetwarzania odpadów (zastosowanie odmetanizacji składowisk) [Sówka i Bezyk 2018]. Emisje z gospodarki odpadami we Wrocławiu w 2013 r. stanowiły do 0,1% całkowitej emisji gazów cieplarnianych, czyli około 4,58 kt CO₂-eq. Według badań krajowych działalność rolnicza i hodowlana była odpowiedzialna za emisję GHG w zakresie od 9 do 11%, natomiast w przypadku miasta mniej niż 1,1% (do 4,7 kt CO₂-eq) [Sówka i Bezyk 2018].

Średnia niepewność dla globalnej antropogenicznej emisji CO₂ EDGAR jest szacowana w granicach 9-14% i silnie zależy od danych regionalnych, sektorowych i dotyczących aktywności związanej z wykorzystaniem paliw [Janssens-Maenhout i in. 2019; Crippa i in. 2019]. Rozważany poziom błędów

w szacunkach emisji EDGAR może być obarczony znacznie większą niepewnością w skali miejskiej niż w skali kraju. Niepewność inwentaryzacji przestrzennej CO₂ na poziomie pojedynczej komórki siatki jest często niedoszacowana, ponieważ miasta nie mają wyraźnych granic (bezpośrednio objętych obszarem pikseli EDGAR) w dezagregacji emisji z poziomu kraju. Dezagregacja w skali miejskiej pomija również niektóre emisje ulotne z miast (np. z lotnictwa i dróg wodnych), co może prowadzić do zwiększenia niepewności na poziomie źródeł emisji [Huang i in. 2019; Bun i in. 2019].

Istniejąca inwentaryzacja źródeł biogenicznych we Wrocławiu może zostać ulepszona w stosunku do szacunków zgrubnych poprzez wprowadzenie wartości emisji o pewnej rozdzielczości, uzyskanych w wyniku obserwacji terenowych. Lokalnie oszacowane czynniki specyficzne, zmierzone na obszarze miejskim Wrocławia w latach 2017-2018, obejmowały dominujące rodzaje użytkowania gruntów (użytki zielone, grunty orne, parki) w mieście. W związku z tym, że inwentaryzacja bottom-up nie doszacowała udziału emisji/pochłaniania biogenicznego w całkowitej ilości miejskiego CO₂ we Wrocławiu, podjęto próbę obliczenia rocznego bilansu wymiennej ekosystemowej (net ecosystem exchange, NEE) z komponentów fotosyntezy (gross ecosystem exchange, GEE) i oddychania ekosystemowego (respiration, RESP).

W badaniach tych bilans C roślinności miejskiej obliczono jako skumulowaną sumę godzinowych strumieni CO₂ (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) ekstrapolowaną przez ułamek powierzchni miasta (%) pokryty aktualnym typem roślinności. Szacowano średnie uwalnianie/wchłanianie dwutlenku węgla dla różnych klas użytkowania gruntów i pokrycia terenu we Wrocławiu. Obecnie obszar miejski o powierzchni około 292,55 km² zawiera znaczną część (ponad 56,6%) naturalnej pokrywy roślinnej, takiej jak tereny leśne i krzewy wzdłuż rzek (24,28 km²), łąki i zieleń liniowa (88,06 km²), grunty rolne (53,24 km²) w obrębie mozaiki miejskiej [WODGiK Wrocław 2018].

W badaniu stwierdzono, że rzeczywiste tereny zielone we Wrocławiu, w odniesieniu do 2018 r., mieszczą znaczne zasoby węgla w granicach miasta. Obszary pokryte głównie przez kombinację parków i lasów miejskich wiążą w procesie fotosyntezy ponad -0,71 kt CO₂ km⁻² rok⁻¹, miejskie obszary rolnicze do -0,45 kt CO₂ km⁻² rok⁻¹, a tereny trawiaste (trawniki zagospodarowane, zieleń liniowa, zieleń nieurządzona) średnio -1,82 kt CO₂ km⁻² rok⁻¹. Skalowanie pochłaniania CO₂ na cały obszar miasta wykazało, że rocznie wszystkie kategorie terenów zielonych asymilują (podany wskaźnik NEE jako suma GEE i RESP) około 0,21 Mt CO₂ yr⁻¹. Jest to 1,2-1,3 razy więcej niż wartość respiracji ekosystemów (RESP = 0,68 Mt CO₂ yr⁻¹ vs GEE = -0,89 Mt CO₂ yr⁻¹) obliczona w mieście, co wskazuje, że roślinność we Wrocławiu była w latach 2017-2018 pochłaniaczem biogenego węgla (C) netto [Bezyk i in. 2021, 2022].

Podsumowanie i wnioski końcowe

Obecne badania wykazują, że istnieje duża zmienność parametrów zależnych od różnych czynników klimatycznych i zmiennych sposobów użytkowania terenu, które kontrolują całkowity poziom emisji i przestrzenne wzorce strumieni gazów ekosystemowych na obszarze miejskim. Pomiarzy wskazują,

że na czasową zmienność atmosferycznego CO₂ i CH₄ duży wpływ ma zmienność sezonowa i synoptyczna, fluktuacje strumieni biogenicznych oraz zmiany emisji CO₂ związane z ogrzewaniem wraz ze zmiennością temperatury, zwłaszcza zimą, kiedy zużycie paliw kopalnych jest duże. Obserwacja źródeł i pochłaniaczy C w biosferze w wybranych lokalizacjach pozwoliła na dokładne określenie udziału źródeł biogenicznych w mieście Wrocław. Analiza sektorowych trendów emisji gazów cieplarnianych na obszarze miejskim, w tym porównanie poziomów emisji CO₂ z danymi inwentaryzacyjnymi EDGAR, dała możliwość oceny wcześniej opublikowanych zestawów danych dotyczących antropogenicznej inwentaryzacji CO₂.

Obecne badania podkreślają znaczenie długoterminowych analiz wymiany C między biosferą a atmosferą w odniesieniu do roli emisji biogenicznych w całkowitym miejskim budżecie CO₂. Jak wykazano, atmosferyczne pomiary CO₂ i CH₄ oraz pomiary izotopów węgla mogą być wykorzystane do identyfikacji rodzaju źródła (naturalnego lub antropogenicznego) i śledzenia możliwego udziału składników biogenicznych w lokalnym bilansie C. Jednak jednym z ograniczeń jest to, że końcowe sygnatury izotopowe często nie są znane z dużą dokładnością w przypadku ilościowego określania sygnałów antropogenicznych, co prowadziłoby do przeszacowania potencjalnego uwalniania węgla z biosfery. W związku z tym włączenie innych znaczników, takich jak konwencjonalne składy izotopowe ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$ i $\delta^{18}\text{O-CO}_2$; $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ i $\delta\text{D-CH}_4$) oraz (^{14}C), będzie niezwykle użyteczne w rozdzielaniu źródeł CO₂ i CH₄ w dalszych analizach.

Zalecane są również wieloletnie obserwacje *in situ*, prowadzone na większej liczbie stanowisk, w celu dokładnego scharakteryzowania przestrzennej zmienności mechanizmów kontrolujących produkcję i zużycie CO₂ i CH₄, w tym w atmosferze miejskiej. Jednoroczny okres pomiarowy, ze względu na złożoną strukturę źródeł i procesów w środowisku miejskim, może odzwierciedlać jedynie aktualny etap rocznego uwalniania węgla netto. Dlatego też przyszłe badania izotopowe powinny skupić się przede wszystkim na długoterminowym oszacowaniu reakcji C na wpływ międzyrocznej zmienności klimatu i czynników spowodowanych działalnością człowieka. Pozwoli to z pewnością zweryfikować obecne wyniki badań nad zmiennością czasowo-przestrzenną obiegu CO₂ i CH₄ w atmosferze oraz zaktualizować stopień udziału działalności antropogenicznej na obszarach miejskich, w tym analizowanego obszaru miasta Wrocławia.

Literatura:

- Andersen T., Scheeren B., Peters W., Chen H.L. 2018. A UAV-based active AirCore system for measurements of greenhouse gases. *Atmos. Meas. Tech.* 11, 2683-2699.
- Andersen T., Vinkovic K., de Vries M., Kers B., Necki J., Swolkien J., Chen H. 2021. Quantifying methane emissions from coal mining ventilation shafts using an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system. *Atmos. Environ. X* 12 (May), 100135. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100135> (dostęp w dn.: 15.07.2021).
- Bahn M., Schmitt M., Siegwolf R., Richter A., Brüggemann N. 2009. Does photosynthesis affect grassland soil-respired CO₂ and its carbon isotope composition on a diurnal timescale? *New Phytol.*, 182: 451-460.

- Bergamaschi P., Danila A., Weiss R.F., Ciais P., Thompson R.L., Brunner D., Levin I., Meijer Y., Chevallier F., Janssens-Maenhout G., Bovensmann H., Crisp D., Basu S., Dlugokencky E., Engelen R., Gerbig C., Günther D., Vermeulen A.T., Vogel F. 2018. Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/759928, JRC111789.
- Bezyk Y., Sówka I., Górka M., Nęcki J. 2022. Spatial and temporal patterns of methane uptake in the urban environment. *Urban Climate*, 41, 101073. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101073> (dostęp w dn.: 17.04.2022).
- Bezyk Y., Sówka I., Górka M. 2021. Assessment of urban CO₂ budget: Anthropogenic and biogenic inputs. *Urban Climate*, 39, 100949. doi:10.1016/j.uclim.2021.100949 (dostęp w dn.: 17.04.2022).
- Brand W., Rothe M., Sperlich P., Strube M., Wendeberg M. 2016. Automated simultaneous measurement of the δ¹³C and δ²H values of methane and the δ¹³C and δ¹⁸O values of carbon dioxide in flask samples using a new multi cryo-trap/gas chromatography/isotope ratio mass spectrometry system, *Rapid Commun. Mass Sp.*, 30, 1523-1539, <https://doi.org/10.1002/rcm.7587> (dostęp w dn.: 27.07.2021).
- Brewer P.J., Kim J.S., Lee S., Tarasova O., Viallon J., Flores Jardines E., Griffith D. 2019. Advances in reference materials and measurement techniques for greenhouse gas atmospheric observations. *Metrologia*, doi:10.1088/1681-7575/ab1506 (dostęp w dn. 19.12.2019).
- Brondizio E., Solecki W., Leemans R. 2015. Climate Change: a Virtual Special Issue with Commentary for #COP21 [WWW Document]. <https://www.elsevier.com/connect/climate-change-a-virtual-special-issue-with-commentary-for-cop21#limits> (dostęp w dn. 19.12.2019).
- Bun R., Nahorski Z., Horabik-Pyzel J., Danylo O., See L., Charkovska N., Topylko P., Halushchak M., Lesiv M., Valakh M., Kinakh V. 2019. Development of a high-resolution spatial inventory of greenhouse gas emissions for Poland from stationary and mobile sources. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24, 853-880. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9791-2> (dostęp w dn.: 15.07.2021).
- Cai Q., Yan X., Li Y., Wang L. 2018. Global patterns of human and livestock respiration. *Scientific Reports*, 8(1).
- Carrozzo M., De Vito S., Esposito E., Salvato M., Formisano F., Massera E., Di Francia G., Veneri P.D., Iadaresta M., Mennella A. 2018. UAV intelligent chemical multisensor payload for networked and impromptu gas monitoring tasks. In *Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace, Rome, Italy, 20-22 June 2018*, pp. 112-116. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453543 (dostęp w dn. 04.04.2021).
- Candy S., Larsen K., Twomey P., McGrail S., Ryan C. 2017. *Pathways 2040. Results from Visions and Pathways 2040: Scenarios and Pathways to Low Carbon Living*. Melbourne, Australia.
- Chang C.-C., Wang J.-L., Lin M.-R., Ou-Yang C.-F., Pan H.-H., Chen Y.-C. 2018. A study of atmospheric mixing of trace gases by aerial sampling with a multi-rotor drone. *Atmos. Environ.* 184, 254-261.
- Chief Inspectorate of Environmental Protection, CiOIP. (pl. GIOŚ). [WWW Document]. <https://www.gios.gov.pl/en/> (dostęp w dn. 08.04.2022).
- Churkina G. 2016. The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle. *Front. Ecol. Evol.* 3. <https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00144> (dostęp w dn.: 17.07.2021).
- Crippa M., Oreggioni G., Guizzardi D., Muntean M., Schaaf E., Lo Vullo E., Solazzo E., Monforti-Ferrario F., Olivier J.G.J., Vignati E. Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries – 2019 Report, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, doi:10.2760/687800, JRC117610 (dostęp w dn.: 13.07.2021).
- Cui Y.Y., Brioude J., McKeen S.A., Angevine W.M., Kim S.-W., Frost G.J., Trainer M. 2015. Top-down estimate of methane emissions in California using a mesoscale inverse modeling technique: The South Coast Air Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(13), 6698-6711. doi:10.1002/2014jd023002 (dostęp w dn.: 13.07.2021).

- Ebi Kristie L., McGregor, Glenn. 2008. Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts. *Environmental Health Perspectives*, 116(11), 1449–1455. doi:10.1289/ehp.11463 (dostęp w dn.: 10.07.2021).
- European Environmental Agency (EPA). The air and climate system. <https://www.eea.europa.eu/soer/2015/europe/the-air-and-climate-system> (dostęp w dn. 08.04.2022).
- Fjelsted L., Christensen A., Larsen J., Kjeldsen P., Scheutz C. 2019. Assessment of a landfill methane emission screening method using an unmanned aerial vehicle mounted thermal infrared camera – A field study. *Waste Manag.* 87, 893-904. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.031> (dostęp w dn.: 17.07.2021).
- Flanagan L.B., Ehleringer J.R. 1998. Ecosystem-atmosphere CO₂ exchange: interpreting signals of change using stable isotope ratios. *Trends in Ecology & Evolution*, 13(1), 10-14, doi:10.1016/s0169-5347(97)01275-5 (dostęp w dn.: 19.07.2021).
- Flores E., Viallon J., Moussay P., Griffith D.W.T., Wielgosz R.I. 2017. Calibration Strategies for FTIR and Other Isotope Ratio Infrared Spectrometer Instruments for Accurate δ¹³C and δ¹⁸O Measurements of CO₂ in Air. *Analytical Chemistry*, 89(6), 3648-3655, doi:10.1021/acs.analchem.6b05063 (dostęp w dn.: 27.07.2021).
- Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Zaehle S. 2020. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data* 12, 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020> (dostęp w dn.: 19.07.2021).
- Fry M.M., Schwarzkopf M.D., Adelman Z., West J.J. 2014. Air quality and radiative forcing impacts of anthropogenic volatile organic compound emissions from ten world regions, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 523-535, <https://doi.org/10.5194/acp-14-523-2014> (dostęp w dn.: 19.07.2021).
- Gålfalk Magnus, Sören Nilsson Påledal, David Bastviken. 2021. Sensitive Drone Mapping of Methane Emissions without the Need for Supplementary Ground-Based Measurements. *ACS Earth and Space Chemistry*, (), doi:10.1021/acsearthspacechem.1c00106 (dostęp w dn.: 19.07.2021).
- Gately C.K., Hutyra L.R. 2017. Large Uncertainties in Urban-Scale Carbon Emissions. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 11,242-11,260. <https://doi.org/10.1002/2017JD027359> (dostęp w dn.: 19.07.2021).
- Górka M, Lewicka-Szczebak D. 2013. One-year spatial and temporal monitoring of concentration and carbon isotopic composition of atmospheric CO₂ in a Wrocław (SW Poland) city area. *Appl Geochem* 35:7-13.
- Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jędrysek M.-O. 2011. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂. *Environ. Pollut.*, 159, pp. 294-301.
- Guo Q., Peng H., Hong B. 2021. Variations of methane stable isotopic values from an Alpine peatland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Geochim* 40, 473-483. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00477-z> (dostęp w dn.:20.04.2022).
- Hare V. J., Loftus E., Jeffrey A., Ramsey C.B. 2018. Atmospheric CO₂ effect on stable carbon isotope composition of terrestrial fossil archives. *Nature Communications*, 9(1), doi:10.1038/s41467-017-02691-x (dostęp w dn.: 18.07.2021).
- Hollenbeck D., Zulevic D., Chen Y. 2021. Advanced Leak Detection and Quantification of Methane Emissions Using sUAS. *Drones* 2021, 5, 117. <https://doi.org/10.3390/drones5040117> (dostęp w dn.: 18.04.2022).
- Huang W., Xiao W., Zhang M., Wang W., Xu J., Hu Y., Lee X. 2019. Anthropogenic CH₄ Emissions in the Yangtze River Delta Based on a 'Top-Down' Method. *Atmosphere*, 10(4), 185, doi:10.3390/atmos10040185 (dostęp w dn.: 11.07.2021).
- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 7: Precursors and Indirect Emissions. Edited by Simon Eggelston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe. 2006.
- Jackson R.B., Down A., Phillips N.G., Ackley R.C., Cook C.W., Plata D.L., Zhao K. 2014. Natural Gas Pipeline Leaks Across Washington, DC. *Environmental Science & Technology*, 48(3), 2051-2058, doi:10.1021/es404474x (dostęp w dn.: 10.07.2021).

- Jasek A., Zimnoch M., Gorczyca Z., Smula E., Rozanski K. 2014. Seasonal variability of soil CO₂ flux and its carbon isotope composition in Krakow urban area, Southern Poland. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 50(2), 143-155, [doi:10.1080/10256016.2014.868455](https://doi.org/10.1080/10256016.2014.868455) (dostęp w dn.: 12.07.2021).
- Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Muntean M., Schaaf E., Dentener F., Bergamaschi P., Pagliari V., Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., van Aardenne J.A., Monni S., Doering U., Petrescu A.M.R. 2017. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970-2012, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2017-79> (dostęp w dn.: 17.07.2021).
- Karl T.R., Trenberth K.E. 2003. Modern global climate change. *Science*. 302:1719-1723, PMID 14657489, [doi:10.1126/science.1090228](https://doi.org/10.1126/science.1090228) (dostęp w dn.: 11.07.2021).
- Kaur P., O'Connor P.B. 2007. Quantitative Determination of Isotope Ratios from Experimental Isotopic Distributions. *Analytical Chemistry*, 79(3), 1198-1204, [doi:10.1021/ac061535z](https://doi.org/10.1021/ac061535z) (dostęp w dn.:20.07.2021).
- Keppel-Aleks G., Wennberg P.O., Schneider T. 2011. Sources of variations in total column carbon dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 3581, 3593, [doi:10.5194/acp-11-3581-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-3581-2011) (dostęp w dn.:20.07.2021).
- KOBIZE. Poland's National Inventory Report 2019. Greenhouse Gas Inventory for 1988-2017. Submission under the UN Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol. National Centre for Emission Management (KOBiZE), Warsaw 2019.
- Li C., Han W., Peng M., Zhang M., Yao X., Liu W., Wang T. 2020. An Unmanned Aerial Vehicle-Based Gas Sampling System for Analyzing CO₂ and Atmospheric Particulate Matter in Laboratory. *Sensors*, 20, 1051. <https://doi.org/10.3390/s20041051> (dostęp w dn.:20.07.2021).
- Liang L. L., Riveros-Iregui D.A. and Risk D.A. 2016. Spatial and seasonal variabilities of the stable carbon isotope composition of soil CO₂ concentration and flux in complex terrain, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 121(9), 2015JG003193, [doi:10.1002/2015JG003193](https://doi.org/10.1002/2015JG003193) (dostęp w dn.:22.07.2021).
- Mbow H.-O.P., Reisinger A., Canadell J., O'Brien P. 2017. Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems., by Pete Smith (Chair), Mark Howden, Thelma Krug, Valérie Masson-Delmotte, Cheikh Mbow, Hans-Otto Pörtner, Andy Reisinger, Josep Canadell & Phillip O'Brien, FAO-IPCC.
- McKeen S.A., Hsie E.-Y., Frost G.J., Neuman J.A., Pollack I.B., Peischl J., Ryerson T.B., Holloway J., Brown S.S., Nowak J.B., Roberts J.M., Wofsy S.C., Santoni G.W., Oda T., Trainer M. 2013. Top-down estimate of surface flux in the Los Angeles Basin using a mesoscale inverse modeling technique: assessing anthropogenic emissions of CO, NO_x and CO₂ and their impacts, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 3661-3677, <https://doi.org/10.5194/acp-13-3661-2013> (dostęp w dn. 26.07.2021).
- Midani F.S., Wynn M.L., Schnell S. 2017. The importance of accurately correcting for the natural abundance of stable isotopes. *Analytical Biochemistry*, 520, 27-43, [doi:10.1016/j.ab.2016.12.011](https://doi.org/10.1016/j.ab.2016.12.011) (dostęp w dn. 26.07.2021).
- Moore J., Jacobson A.D. 2016. Data from: Seasonally varying contributions to urban CO₂ in the Chicago, IL, USA region: insights from a high-resolution CO₂ concentration and δ¹³C record, Dryad, Dataset, <https://doi.org/10.5061/dryad.h8d0n> (dostęp w dn. 26.07.2021).
- Nakazawa T. 2020. Current understanding of the global cycling of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences*, 96(9), 394-419, <https://doi.org/10.2183/pjab.96.030> (dostęp w dn.: 26.07.2021).
- Nathan B., Lauvaux T., Turnbull J., Gurney K. 2018. Investigations into the use of multi-species measurements for source apportionment of the Indianapolis fossil fuel CO₂ signal. *Elem Sci Anth*, 6(1), p.21, <http://doi.org/10.1525/elementa.131> (dostęp w dn.:27.07.2021).
- Newman S., Xu X., Gurney K.R., Hsu Y.K., Li K.F., Jiang X., Keeling R., Feng S., O'Keefe D., Patarasuk R., Wong K.W., Rao P., Fischer M.L., and Yung Y.L. 2016. Toward consistency between trends in bottom-up CO₂ emissions and top-down atmospheric measurements in the Los Angeles megacity, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3843-3863, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3843-2016> (dostęp w dn.: 28.07.2021).

- Oleniacz R., Gorzelnik T. 2020. Assessment of the Variability of Air Pollutant Concentrations at Industrial, Traffic and Urban Background Stations in Krakow (Poland) Using Statistical Methods. *Sustainability*. 13, 5623. <https://doi.org/10.3390/su13105623> (dostęp w dn.: 27.07.2021).
- Pataki D.E., Alig R.J., Fung A.S., Golubiewski N.E., Kennedy C.A., McPherson E.G. 2006. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biol.* 12, 2092-2102, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01242.x (dostęp w dn.: 27.07.2021).
- Picarro. Gas Isotope Analyzers. https://www.picarro.com/products/gas_isotope_analyzers (dostęp w dn. 10.04.2022).
- Richardson S.J., Miles N.L., Davis K.J., Crosson E.R., Rella C.W., Andrews A.E. 2012. Field testing of cavity ring-down spectroscopy analyzers measuring carbon dioxide and water vapor, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29, 397-406, doi:10.1175/JTECH-D-11-00063.1 (dostęp w dn. 18.04.2021).
- Ryoo J.M., Iraci L.T., Tanaka T., Marrero J.E., Yates E.L., Fung I., Michalak A.M., Tadic J., Gore W., Bui T.P. 2019. Quantification of CO₂ and CH₄ emissions over Sacramento, California, based on divergence theorem using aircraft Measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2949-2966, <https://doi.org/10.5194/amt-2018-254> (dostęp w dn.: 15.07.2022).
- Sargent M., Barrera Y., Nehr Korn T., Hutyra L. R., Gately C.K., Jones T., Wofsy S.C. 2018. Anthropogenic and biogenic CO₂ fluxes in the Boston urban region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(29), 7491-7496, doi:10.1073/pnas.1803715115 (dostęp w dn.: 15.07.2022).
- Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Zhuang Q. 2020. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth System Science Data* 12, 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020> (dostęp w dn.: 15.07.2022).
- Schröpfer T., Menz S., 2019. *Dense and Green Building Typologies*, SpringerBriefs in Architectural Design and Technology. Springer Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3035-3> (dostęp w dn.: 13.07.2021).
- Sekula P., Zimnoch M., Bartyzel J., Bokwa A., Kud M., Necki J. 2021. Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics. *Sensors* 21, 2920. <https://doi.org/10.3390/s21092920> (dostęp w dn.: 13.07.2021).
- Solomon P.A., Vallano D., Lunden M., LaFranchi B., Blanchard C.L., Shaw S.L. 2020. Mobile-platform measurement of air pollutant concentrations in California: performance assessment, statistical methods for evaluating spatial variations, and spatial representativeness, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 3277-3301, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3277-2020> (dostęp w dn.: 10.07.2021).
- Sówka I., Bezyk Y. 2018. Greenhouse gas emission accounting at urban level: A case study of the city of Wrocław (Poland). *Atmos. Pollut. Res.* 9, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.10.005> (dostęp w dn.: 11.07.2022).
- The Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). Air Pollution and Climate Change. <https://www.iass-potsdam.de/en/output/dossiers/air-pollution-and-climate-change> (dostęp w dn. 08.04.2022).
- Turnbull J.C., Keller E.D., Norris M.W., Wiltshire R.M. 2016. Independent evaluation of point source fossil fuel CO₂ emissions to better than 10%. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(37), 10287-10291, doi:10.1073/pnas.1602824113 (dostęp w dn. 18.04.2021).
- United Nations (UN). Air pollution and climate change - tackling both problems in tandem. <https://www.un.org/press/en/2003/envdev717.doc.htm> (dostęp w dn. 08.04.2022).
- United States Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research> (dostęp w dn. 08.04.2022).
- Van Dingenen R., Crippa M., Maenhout G., Guizzardi D., Dentener F. 2018. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. Joint Research Centre (JRC) for policy report. 2018.
- Vergote, Tine L.I., BodËc, Samuel, De Dobbelaere, Anke E.J., Buysse, Jeroen, Meers, Erik, Volcke, Eveline I.P. 2020. Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure

mono-digestion. *Biosystems Engineering*, 196(), 159-171. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.05.011 (dostęp w dn. 15.07.2021).

Verhulst K.R., Karion A., Kim J., Salameh P.K., Keeling R.F., Newman S., Miller J., Sloop C., Pongetti T., Rao P., Wong C., Hopkins F.M., Yadav V., Weiss R.F., Duren R.M., Miller C.E. 2017. Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8313-8341, <https://doi.org/10.5194/acp-17-8313-2017> (dostęp w dn. 15.07.2021).

Vinković K., Andersen T., Marcel de Vries, Kers B., Steven van Heuven, Peters W., Hensen A., Pim van den Bulk, Chen H. 2022. Evaluating the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based active AirCore system to quantify methane emissions from dairy cows. *Science of The Total Environment*. Volume 831, 154898, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154898> (dostęp w dn.: 15.04.2022).

Ward H.C., Kotthaus S., Grimmond C.S.B., Bjarkegren A., Wilkinson M., Morrison W.T.J., Evans J.G., Morison J.I.L., Iamarino M. 2015. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environ. Pollut.* 198, 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.031> (dostęp w dn.: 11.07.2021).

Wagner T., Magill C.R., Herrle J.O. 2018. Carbon Isotopes. In: White W.M. (eds) *Encyclopedia of Geochemistry*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.

Wang J.-L., Jacobson G., Rella C.W., Chang C.-Y., Liu I., Liu W.-T., Chang C.-C. 2013. Flask sample measurements for CO₂, CH₄ and CO using cavity ring-down spectrometry. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6(4), 7633-7657, doi:10.5194/amtd-6-7633-2013 (dostęp w dn.: 17.11.2020).

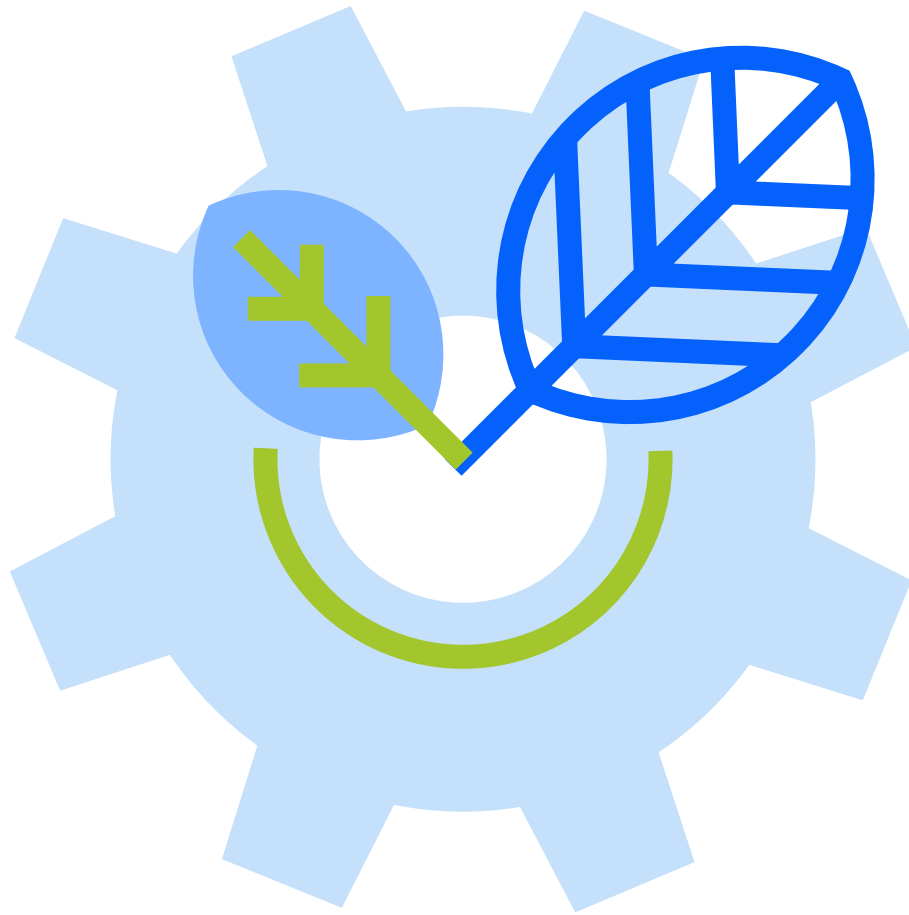
Ward H.C., Kotthaus S., Grimmond C.S., Bjarkegren B., Wilkinson A., Morrison M., Iamarino W.T. 2015. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environmental Pollution*, 198, 186-200.

WODGiK Wrocław. 2018. Lower Silesian Voivodeship Centre of Geodetic and Cartographic Documentation in Wrocław. <http://wgik.dolnyslask.pl/wodgik> (dostęp w dn.: 17.11.2020).

Zazzeri G., Lowry D., Fisher R. E., France J. L., Lanoisellé M., Grimmond C.S.B., Nisbet E.G. 2017. Evaluating methane inventories by isotopic analysis in the London region. *Scientific Reports*, 7(1), doi:10.1038/s41598-017-04802-6 (dostęp w dn.: 11.07.2021).

Zhang B. 2020. The Effect of Aerosols to Climate Change and Society. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 55-78. doi: 10.4236/gep.2020.88006 (dostęp w dn.: 10.07.2021).

Zimnoch M., Necki J., Chmura L., Jasek A., Jelen D., Galkowski M., Kuc M., Gorczyca Z., Bartyzel J., Rozanski K. 2018. Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang.*, <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-018-9821-0> (dostęp w dn.: 12.07.2021).



CZĘŚĆ III

Możliwości i perspektywy
rozwiązań w zakresie
procesów adaptacyjnych
i mitygacyjnych

Rozdział 1

Usługi ekosystemowe w ochronie klimatu i adaptacji do jego zmiany na terenach zurbanizowanych – rekomendacje dla Polski

dr hab. Małgorzata Burchard-Dziubińska

Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny

■ Wstęp

Poszerzanie wiedzy na temat usług ekosystemowych na obszarach zurbanizowanych jest pochodną rosnącego zainteresowania tego typu usługami z uwagi na ich niekwestionowane znaczenie dla zrównoważonego rozwoju miast. Postępująca w szybkim tempie urbanizacja wiąże się ze zmianą charakteru miast, w których mieszkańcom coraz trudniej połączyć dobrobyt ekonomiczny z fizycznym i psychicznym dobrostanem. Ważnym i przez długi czas lekceważonym czynnikiem wpływającym na taki stan rzeczy było trwanie elementów przynależnych do lokalnej przyrody, chowanie rzek w podziemnych kanałach, zawłaszczanie kolejnych terenów zielonych pod zabudowę, zatracenie się w „betonozie”, inaczej mówiąc, ujarzmianie natury zamiast przemyślanej z nią koegzystencji. W ciągu ostatnich dekad stało się też jasne, że skutki zmiany klimatu nie omijają miast, a same miasta są znaczącym emitentem gazów cieplarnianych. W efekcie miejskie wyspy ciepła stają się jeszcze bardziej uciążliwe, powodzie błyskawiczne – częstsze i bardziej niebezpieczne, koszty utrzymania miast – wyższe, a jakość życia mieszkańców – niższa. Wyniki prowadzonych na świecie badań nie pozostawiają złudzeń. Aby przeciwdziałać tym negatywnym tendencjom, miasta muszą w większym stopniu otworzyć się na naturę i włączyć do procesu zarządzania wiedzę, jaką dziś mamy na temat usług ekosystemowych.

Biorąc pod uwagę szereg istotnych uwarunkowań funkcjonowania polskich miast, a zwłaszcza: zamieszkiwanie w miastach ponad 60% populacji Polski [GUS 2021], rozlewanie się miast na tereny

podmiejskie (urban sprawl) [Litwińska 2008; Karwińska i in. 2018] i rosnący wpływ zmiany klimatu na miejskie systemy społeczno-gospodarcze [Klimat ryzyka 2019], zasadne jest poszukiwanie sposobów wykorzystania elementów błękitno-zielonej infrastruktury do wspierania rozwoju obszarów miejskich. Interesującą kwestią jest rozpoznanie, na ile proces ten może być poddany uspołecznieniu, a na ile musi pozostać w domenie działania władz oraz jakich korzyści można się spodziewać, jeśli zostawimy go naturze.

W niniejszym rozdziale celem prowadzonych rozważań jest wykazanie, że w miastach można z powodzeniem wykorzystać usługi ekosystemowe zarówno do ochrony klimatu, jak i adaptacji do jego zmiany, podnosząc środowiskową skuteczność i ekonomiczną efektywność tych działań. Badanie roli miejskich ekosystemów wymaga podejścia interdyscyplinarnego, integracji wiedzy z zakresu nauk przyrodniczych, ekonomii i zarządzania. W rozdziale wykorzystano analizę literatury przedmiotu i danych statystycznych GUS oraz wyniki własnych badań miejskiego rolnictwa i ogrodnictwa przeżywających obecnie prawdziwy renesans.

■ Usługi ekosystemowe – wprowadzenie do problematyki

Koncepcja usług ekosystemowych została pierwotnie wykorzystana w celu zwrócenia uwagi na korzyści, jakie ekosystemy generują dla społeczeństwa, i podniesienia świadomości w zakresie ochrony różnorodności biologicznej [Ehrlich i in. 1981]. Przełomowa w dyskusji nad rodzajami i wyceną wartości usług ekosystemowych publikacja: „The value of the world’s ecosystem services and natural capital” ukazała się w *Nature* w 1997 r. [Costanza i in. 1997]. Od tej pory temat podejmowali też inni autorzy, proponując własne wykazy usług ekosystemowych, oszacowania ich wartości oraz rozwiązania o charakterze metodycznym [Żylicz 2000; de Groot i in. 2002; Millennium Ecosystem Assessment 2005; TEEB 2011]. W rozdziale została wykorzystana klasyfikacja Common International Classification of Ecosystem Services [CICES 2015], w której wymienionych zostało 47 takich usług. Szesnaście z nich odnosi się do dostarczania materiałów (i energii), dwadzieścia – do regulacji (podtrzymywania) procesów naturalnych i jedenaście – do funkcji społecznych (kulturowych). Z punktu widzenia celu rozważań najistotniejsze są usługi regulacyjne związane z regulacją klimatu i łagodzeniem ekstremów pogodowych, ochroną przeciwpowodziową i regulacją wód opadowych, oczyszczaniem powietrza i wody oraz regulacją temperatury. Pozostają one w ścisłym związku z usługami takimi jak: fotosynteza i produkcja pierwotna, obiegi pierwiastków i substancji organicznych w przyrodzie, usługi siedliskowe dla różnych gatunków. Wydawać by się mogło, że w miastach ekosystemowe usługi zaopatrzeniowe w zakresie dostarczania żywności, zasobów leczniczych czy niektórych surowców i wody pełnią funkcje poboczne. Ich znaczenie nie powinno być jednak bagatelizowane, bo często występują one łącznie z funkcjami społecznymi związanymi z wypoczynkiem, rekreacją, edukacją i zdrowiem. Niektóre z elementów błękitno-zielonej infrastruktury mają też duże znaczenie kulturowe i estetyczne. W badaniach podkreśla się rolę miejskiej różnorodności biologicznej w dostarczaniu usług ekosystemowych związanych z utrzymaniem i podnoszeniem dobrostanu mieszkańców [Botzat i in. 2016], a także wpływ procesów zachodzących w środowisku miejskim na zachowanie bioróżnorodności. Z jednej strony rozrastanie się i rozlewanie miast na suburbia

stanowi zagrożenie dla tych elementów otoczenia, które były jeszcze naturalne lub półnaturalne, z drugiej zaś obserwuje się coraz bardziej intensywne zasiedlanie miast przez gatunki do niedawna trzymające się z dala od dużych siedlisk ludzkich. Łatwo zauważalnym przykładem mogą być ptaki takie jak sroki, jerzyki, sokoły pustułki [Karczewski 2021], ale dotyczy to również owadów, płazów, a nawet dużych ssaków (lisy, dziki). Miejskie tereny zielone stają się istotnym elementem w procesie podtrzymywania różnorodności biologicznej. Ponieważ, ze względu na swą specyfikę, reprezentują prawdziwą mozaikę lokalnych ekosystemów, poznanie ich ekologii powinno być przedmiotem dalszych szczegółowych badań, również w kontekście renaturyzacji terenów zdegradowanych i zarządzania usługami, których mogą być źródłem [Bezák, Lyytimäki 2011; Elmqvist i in. 2015; Lepczyk i in 2017]. Odrębną kwestią jest umiejętne zarządzanie ekosystemami na terenach zurbanizowanych. Pozostaje ono wyzwaniem zarówno dla nauki, jak i dla władz lokalnych. Wymaga współpracy z ekologami, którzy muszą określić skutki interwencji antropogenicznych, aby zaproponować praktyki korzystne dla organizmów i całych ekosystemów będących źródłem usług. Aby zarządzać dostarczaniem usług ekosystemowych ekolodzy muszą ustalić, czy usługi podlegają wspólnemu czynnikowi, czy i jak są ze sobą bezpośrednio powiązane [Birkhofer i in. 2015]. Badania usług ekosystemowych powinny objąć również przewidywanie konsekwencji przyszłych opcji zarządzania. W tym celu można stosować przykładowo modele statystyczne ukierunkowane na identyfikację sił napędowych zmian w świadczeniu usług oraz do przewidywania fluktuacji świadczenia usług w wyniku zmian środowiskowych i interwencji antropogenicznych [Evans i in. 2012]. Inną opcją są modele procesowe bazujące na założeniu, że istotne cechy procesów ekologicznych można ekstrapolować na warunki, których obecnie nie obserwujemy. Modele te bazują na wiedzy na temat dynamiki procesów ekologicznych, tj. pośrednich usług ekosystemowych, w tym interakcji, sprzężeń zwrotnych i niepewności [Nicholson i in. 2009]. W tym kontekście na szczególną uwagę zasługują warunki klimatyczne, ponieważ zmiana klimatu będzie miała w przyszłości silny wpływ na usługi ekosystemowe [Montoya, Raffaelli 2010].

■ Usługi ekosystemowe na terenach zurbanizowanych w Polsce – wybrane wyniki badań

Wyniki badań dotyczących bezpośrednio i pośrednio usług ekosystemowych na terenach zurbanizowanych w Polsce zostały udokumentowane w obszernym piśmiennictwie. Ich przegląd według przedmiotu badań ukazuje bogactwo form obecności natury w miastach, w których możemy wyróżnić zieleń formalną (parki, skwery, zieleńce, pasy zieleni wzdłuż ulic, ogrody, łąki, zielone dachy, cmentarze) i nieformalną (spontanicznie zazieleniane, opuszczone działki i place, nieużytki na terenach peryferyjnych, tereny poprzemysłowe, niepielęgnowane zadrzewienia z samosiewu) oraz różne rodzaje wód (rzeki, jeziora, stawy i oczka wodne).

W celu zilustrowania wieloaspektowości omawianej problematyki posłużymy się wybranymi przykładami. Zaczniemy od serii wydawniczej „Parki i ogrody Łodzi”, w ramach której pod redakcją r. Olaczka [2006, 2008, 2010, 2012] wydano książki ukazujące zarówno bogactwo gatunków roślin, jakimi lubili otaczać swe wille i pałace fabrykanci budujący od XIX w. Łódź przemysłową, jak i historyczny,

społeczny i użytkowy kontekst powstawania tych miejsc (parki i ogrody przydomowe, ogrody dyrektorskie, szkolne, szpitalne). Obok celowo tworzonych elementów zielonej infrastruktury kryją się wciąż elementy pochodzenia naturalnego. To właśnie im poświęcona została praca zbiorowa pod redakcją J. K. Kurowskiego i P. Witosławskiego [2009] „Zielone skarby Łodzi – relikty naturalnej przyrody miasta”. Wszystkie wspomniane książki znakomicie oddają charakter opisywanych miejsc, a dzięki pieczołowitej inwentaryzacji gatunków także uświadamiają ich bogactwo – potencjalne i faktyczne źródło usług ekosystemowych o wielorakim charakterze, w tym także związanych z podtrzymaniem bioróżnorodności i witalności siedlisk. Podobne zielone skarby znajdują się oczywiście w innych miastach Polski. Nie wszędzie doczekały się jednak równie udanej inwentaryzacji, która zawsze powinna poprzedzać decyzje o przyszłości takich miejsc.

Ważnym elementem przestrzeni w wielu polskich miastach są ogrody działkowe, które od lat stanowią przedmiot zainteresowania naukowców z różnych dziedzin. Próbą usystematyzowania wiedzy w tym zakresie był program badawczy realizowany w ramach COST TU 1201 [Giedych, Latkowska 2015]. Celem programu było m.in. poszerzenie wiedzy odnośnie do roli społecznej i ekologicznej ogrodów działkowych oraz na temat różnych modeli zarządzania nimi. Obecnie w Polsce działa prawie 5 tys. Rodzinnych Ogrodów Działkowych (ROD), z czego ok. 90% stanowią ogrody zlokalizowane w miastach. Jak ustalono, według danych zawartych w bazach Biblioteki Nauki (AGRO i BazTech, CEON), w latach 1990-2014 (wg stanu na 28 lipca 2014 r.) ukazały się łącznie 963 artykuły, które w tytule lub słowach kluczowych zawierały termin „ogrody działkowe”. Większość z nich to artykuły zamieszczone w czasopismach popularnych i popularno-naukowych (93,3%). W ramach projektu zidentyfikowano także dość liczne publikacje, które dotyczyły zawartości metali ciężkich w glebach i w roślinach uprawianych w ogrodach działkowych i zanieczyszczenia żywności w różnych miejscach Polski. To są wątki bardzo ważne z punktu widzenia możliwości wykorzystywania funkcji zaopatrzeniowej ogrodów działkowych, rozpoznania ich wpływu na zdrowie i jakość życia mieszkańców miast. Badania przeprowadzono m.in. na Górnym Śląsku, w Krakowie, Wrocławiu, Wałbrzychu, Warszawie, a więc w rejonach dotkniętych długotrwałą presją i silnie zdegradowanymi. Ekologicznymi aspektami funkcjonowania ogrodów działkowych zajmowali się m.in. A. Graczyk [2010], J. Kronenberg i in. [2013].

Problematyka rolnictwa miejskiego była z kolei podejmowana m.in. przez J. Giećewicz [2005], P. Krzyk i in. [2013]. Kompleksowe podejście do usług ekosystemowych zawiera książka „Usługi ekosystemów w rozwoju zrównoważonym gmin regionu wysoko zurbanizowanego” [Lorek 2019], w której autorka przedstawiła wyniki kilku badań prowadzonych w latach 1999-2018 wśród mieszkańców i władz samorządowych na terenie województwa śląskiego. Jasno z nich wynika konieczność stosowania podejścia interdyscyplinarnego, doskonalenia metod zarządzania tymi usługami i ich wyceny.

Prowadzone w Polsce badania dotyczyły również ekosystemowej roli drzew w miastach i obejmowały kwestie gospodarowania tym specyficznym zasobem. W alarmistycznym tonie utrzymana jest publikacja J. Kronenberga, E. Łaskiewicz i J. Sziło [2021], która ukazała się w języku angielskim pod tytułem, który w tłumaczeniu na polski brzmi „Głosowanie piłą łańcuchową: co się dzieje, gdy ludzie mają możliwość swobodnego usuwania drzew miejskich?”. Jak wynika z tych badań, 40% drzew,

które zniknęły w Łodzi w latach 2010-2019, usunięto w czasie obowiązywania zliberalizowanych przepisów ustawy Prawo ochrony środowiska, (tzw. „Lex Szyszko”), tj. w pierwszej połowie 2017 r. Aż 80% z tych drzew usunięto z terenów prywatnych. Wynik ten jest zbieżny z raportem NIK – Usuwanie drzew i krzewów oraz zagospodarowanie pozyskanego drewna [2019]. Wnioski okazały się jednoznaczne – liberalizacja przepisów w zakresie ochrony drzew otworzyła furtkę do całkowicie pozbawionej kontroli wycinki. Od 1 stycznia 2017 r. z obowiązku uzyskania zezwolenia zwolnione zostały osoby fizyczne zamierzające usunąć drzewa na cele niezwiązane z prowadzeniem działalności gospodarczej. W efekcie organy gminne nie wiedzą, ile drzew usunięto przez blisko pół roku, do czasu kolejnej zmiany przepisów. Na inne aspekty gospodarowania miejskimi drzewostanami zwrócił uwagę T. Żylicz [2020], który w swym artykule podjął temat zarządzania zielenią miejską w Warszawie z perspektywy współpracy instytucji dwóch poziomów hierarchicznych (model pryncypał – agent – PA). W analizowanym przypadku prezydent miasta chce maksymalizować zdolność usuwania zanieczyszczeń przez sadzone drzewa, podczas gdy zarządca zieleni bierze pod uwagę nie tylko dobre dopasowanie do lokalnych warunków klimatycznych, ale także takie atrybuty jak np. nieuciążliwość dla alergików. W rezultacie skład gatunkowy sadzonych drzew różni się od tego, jaki byłby, gdyby wdrożono model PA zgodny z odgórnymi zachętami.

W polskim piśmiennictwie wielokrotnie był również podejmowany problem wyceny usług ekosystemowych na terenach miejskich [Czembrowski 2016; Czembrowski, Kronenberg, 2016; Dubel, 2017]. Zakres badań zależał od przyjętej metody i celu analiz. W odniesieniu do tego rodzaju analiz nasuwa się generalny wniosek, że stosowanie wyceny usług systemowych w codziennej praktyce decyzyjnej jest zbyt kosztowne i kłopotliwe, aby można było tego typu badania rekomendować jako standardową procedurę. Nikt nie powinien mieć jednak wątpliwości, że usługi te są nośnikiem mierzalnej wartości ekonomicznej. Wiąże się to z poszukiwaniem metod działania skutecznych z punktu widzenia ochrony klimatu i jednocześnie efektywnych ekonomicznie.

Ciekawą opcją jest docenienie „wartości nicnierobienia” (value of doing nothing), czyli roli zieleni nieformalnej, która na równi z obszarami finansowanymi z środków publicznych i prywatnych sprawdza się jako: pochłaniacz dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń powietrza, sposób na sekwestrację węgla, zatrzymywanie wody opadowej i miejsce bytowania różnych gatunków. Także w tym przypadku możemy sięgnąć do wyników projektu zrealizowanego niedawno w Warszawie, gdzie oszacowana zieleń nieformalna zajmuje 10,97% obszarów zielonych w mieście. Obszary przemysłowe i poprzemysłowe obejmują kolejne 5,75% ogółu terenów zielonych. Realizatorzy badania potwierdzili wysoką skuteczność tej „dzikiej” zieleni w świadczeniu usług ekosystemowych [Sikorski i in. 2021].

■ Usługi ekosystemowe miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa na rzecz klimatu

Dziś miejskie ogrodnictwo i rolnictwo przeżywają na świecie prawdziwy renesans. Widać to zarówno w liczbie osób zaangażowanych w tego typu działalność, jak i w innowacyjnym podejściu do samej organizacji pracy, lokalizacji i stosowanych technologii [Guitart i in. 2012].

Miejskie ogrody można podzielić na ogrody indywidualne i zbiorowe. Do pierwszych należą ogrody przydomowe i działkowe, w tym mikroogrody zakładane na dachach, balkonach i tarasach, do drugich – różne ogrody wspólnotowe, szkolne, terapeutyczne i sensoryczne. Zróżnicowana jest ich wielkość – od upraw w donicach balkonowych, przez wciśnięte między domy niewielkie działki, po duże ogrody zakładane na dawnych nieużytkach, terenach przemysłowych oraz na dachach parkingów i innych budynków. W miastach i na ich obrzeżach jest też przestrzeń dla rolnictwa, które oprócz produkcji żywności może pełnić także funkcje rekreacyjne, edukacyjne, terapeutyczne, eksperymentalne i związane z ochroną dziedzictwa kulturowego. Produkcja żywności w mieście może być rodzajem hobby, sposobem na zaoszczędzenie na zakupach, ale może też spełniać inne ważne funkcje społeczne, gospodarcze i ekologiczne, także związane z przejściem do niskoemisyjnej przyszłości [Walker, Salt 2006; Aiken 2012; Goldstein 2016]. Badania wykazały pozytywny wpływ na lokalne społeczności produkcji żywności (zarówno na własny użytek, jak i na sprzedaż) w zaniedbanych dzielnicach mieszkaniowych czy w ogólnodostępnej przestrzeni miejskiej, gdzie sadi się drzewa owocowe z otwartym dostępem dla wszystkich chętnych. W Singapurze mieszkańcy są skłonni nawet kilka lat czekać na możliwość uprawy grządki zlokalizowanej w jednym z publicznych parków czy ogrodów. Tereny te nie są ogrodzone, aby mieszkańcy Singapuru mogli je odwiedzać i (d)ocenić. Każda mini działka składa się z podniesionej grządki (2,5 m x 1 m), jest wyposażona w ziemię w skrzynce do sadzenia oraz schowek do przechowywania narzędzi. Okres dzierżawy tych grządek wynosi zazwyczaj do 3 lat i jest odpłatny [Allotment Gardens]. Ogrodnictwo zbiorowe w specjalnie wyznaczonych miejscach publicznych okazało się czynnikiem ułatwiającym nawiązywanie kontaktów, zacieśnianie więzi społecznych, poprawianie bezpieczeństwa mieszkańców oraz zdobywanie nowej wiedzy i umiejętności. Takie efekty zostały zgłoszone m.in. w wieloletnim projekcie realizowanym w Filadelfii [Branas i in. 2018]. Potwierdza to żywotne zainteresowanie mieszkańców miast działalnością ogrodniczą na własny lub wspólnotowy użytek. W Polsce w okresie pandemii COVID-19 popyt na ogródki w ROD znacznie przewyższył podaż.

W tych specyficznych, tworzonych przez człowieka systemach przyrodniczo-gospodarczych jest ukryty znaczny potencjał, który można wykorzystać do działań na rzecz ochrony klimatu i adaptacji do jego zmiany [Bakker 2000; Mougeot 2006]. Atrakcyjność usług ekosystemowych obszarów wykorzystywanych do produkcji żywności w miastach wynika z możliwości połączenia w jednym miejscu wszystkich rodzajów usług ekosystemowych i czerpania korzyści z funkcji regulacyjnych, zaopatrzeniowych i społeczno-kulturowych (**tabela 1.1**). Jednym z pożądaných efektów jest ograniczenie śladu węglowego miast i zwiększenie ich odporności na stres związany ze zmianą klimatu. Chodzi zwłaszcza o łagodzenie uciążliwości miejskich wysp ciepła, retencjonowanie wód opadowych i ochronę przed powodzią i podtopieniami. Miejskie pola i ogrody biorą też aktywny udział w wychwytywaniu dwutlenku węgla, sekwestracji węgla, oczyszczaniu powietrza i tłumieniu hałasu.

Tabela 1.1. Korzyści z miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa z punktu widzenia ochrony klimatu

Ekologiczne	Ekonomiczne	Społeczne
powiększenie miejskich terenów zielonych	skrócenie drogi „z pola na talerz”, co oznacza mniejsze emisje i koszty związane z transportem	budowanie kapitału społecznego
zmniejszenie śladu węglowego miast	dostęp do świeżej żywności	ujawnianie aktywizmu społecznego
łagodzenie miejskich wysp ciepła	zmniejszenie kosztów utrzymania rodzin	poprawa bezpieczeństwa żywnościowego
poprawa jakości powietrza	podwyższanie wartości nieruchomości	poprawa jakości życia
tłumienie hałasu	zmniejszenie kosztów utrzymania miasta	pozytywny wpływ na zdrowie fizyczne i psychiczne
zwiększanie przechwytywania i infiltracji wód opadowych		wzrost sprawiedliwości ekologicznej i środowiskowej
ochrona przed powodzią i podtopieniami		edukacja w zakresie ogrodnictwa/rolnictwa i klimatu
korzystny wpływ na obieg materii organicznej przez kompostowanie		
zwiększanie i ochrona bioróżnorodności		

Źródło: opracowanie własne.

W prowadzonych w polskich miastach działaniach ukierunkowanych na ochronę klimatu rola usług ekosystemowych miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa pozostaje niedoceniana. Potwierdzają to wyniki dużego projektu „Wczujmy się w klimat”, w ramach którego opracowano 44 miejskie plany adaptacyjne (MPA). Został on zainicjowany przez Ministerstwo Środowiska i realizowany od 12 stycznia 2017 r. do 12 stycznia 2019 r. przez powołane w tym celu konsorcjum we współpracy z władzami miast, mieszkańcami i ekspertami. Skala projektu była znacząca, gdyż wraz z Warszawą realizującą projekt „Adaptcity” objęła 30% populacji Polski. We wszystkich MPA w rozdziałach zatytułowanych „Działania adaptacyjne” uwzględniono kwestie organizacyjne, edukacyjne, informacyjne i techniczne mające na celu zwiększenie odporności miast na:

- wysokie temperatury i fale upałów potęgujące zjawisko miejskiej wyspy ciepła,
- występowanie deszczy nawalnych i błyskawicznych powodzi miejskich,
- występowanie okresów bezopadowych z wysoką temperaturą,
- występowanie silnych i bardzo silnych wiatrów i burz.

Analiza wszystkich MPA pod kątem wykorzystania miejskiego ogrodnictwa i rolnictwa jako elementu wzmacniającego odporność polskich miast na zmianę klimatu wykazała, że ten aspekt nie został

uwzględniony. Odniesienia do ogrodów działkowych i przydomowych dotyczyły jedynie inwentaryzacji terenów zielonych (w miastach: Białystok, Gdynia, Legnica, Lublin, Olsztyn, Poznań, Włocławek, Zabrze). Całkowicie pominięto znaczenie usług ekosystemowych zapewnianych przez ogrodnictwo miejskie. Nie zwrócono również uwagi na potencjalne korzyści ekonomiczne dla budżetów miejskich wynikające z obniżenia kosztów budowy i utrzymania infrastruktury deszczowej, zmniejszenia uciążliwości miejskich wysp ciepła, co z kolei może zmniejszyć liczbę hospitalizacji i zgonów podczas fal upałów. Paradoksem jest, że 12 z 44 miast zaangażowanych w projekt „Wczujmy się w klimat” (Bielsko Biała, Bytom, Chorzów, Czeladź, Częstochowa, Gliwice, Jaworzno, Katowice, Mysłowice, Ruda Śląska, Sosnowiec i Zabrze) to miasta z województwa śląskiego, gdzie tradycja ogródków działkowych jest stara i silna. W 2019 r. na 4614 ogrodów działkowych w Polsce aż 657 o łącznej powierzchni 3490,6 ha znajdowało się w tym województwie [GUS 2019]. Jednak nawet w województwie śląskim, które charakteryzuje się najwyższym w Polsce wskaźnikiem urbanizacji (77,6%) i licznymi problemami ekologicznymi, w tym złą jakością powietrza, nie dostrzeżono ani nie doceniono potencjału ogrodnictwa miejskiego we wzmacnianiu odporności miast na zmianę klimatu. Świadczy to o stereotypowym podejściu do adaptacji miast do tego problemu. Władze polskich miast wolą wydawać pieniądze na szarą infrastrukturę, edukować i informować mieszkańców zamiast z nimi współpracować. Wyzwaniem organizacyjno-zarządczym pozostaje docenienie aktywności lokalnych liderów, ukierunkowanie oddolnych inicjatyw ogrodniczych, aby „przy okazji” realizować zadania związane z ochroną klimatu i adaptacją do jego zmiany [Burchard-Dziubińska 2021].

Wnioski

W dzisiejszych czasach w zarządzaniu miastami obserwujemy rosnące uznanie dla rozwiązań opartych na naturze. Usługi ekosystemowe odgrywają istotną rolę zarówno w ochronie klimatu, jak i w adaptacji do jego zmiany. W pierwszym przypadku chodzi zwłaszcza o wychwytywanie dwutlenku węgla i magazynowanie węgla, retencjonowanie wody, w drugim – o ochronę przeciwpowodziową, zwłaszcza przeciw powodziom błyskawicznym, niwelowanie miejskich wysp ciepła, poprawę jakości powietrza, dostarczanie lokalnie produkowanej żywności itp. Odpowiednie zarządzanie ekosystemami miejskimi ma znaczenie dla ich zrównoważonego rozwoju w wymiarze ekologicznym (zmniejszenie śladu węglowego, neutralizacja i rozkład odpadów, oczyszczanie powietrza, wody i gleb), gospodarczym (obniżenie kosztów utrzymania miast, np. dzięki zwiększeniu przechwytywania i infiltracji wód opadowych i ochronie przed powodzią) oraz społecznym (poprawa bezpieczeństwa żywnościowego i jakości życia mieszkańców).

Wzorem wielu miast na świecie również w Polsce warto docenić potencjał lokalnych społeczności, które poprzez działania ogrodnicze mogą znacząco przyczynić się do wzmocnienia odporności miast na zmianę klimatu. Korzyści z udostępniania mieszkańcom miast nieużytków, terenów poprzemysłowych, a nawet miejsc w publicznych parkach i wokół bloków mieszkalnych pod uprawy są wielorakie. Zachęcając do lokalnej produkcji żywności, można jednocześnie osiągnąć kilka celów: wzmacniać więzi społeczne, tworzyć społeczności produkcyjne sprzyjające rozwojowi gospodarczemu i jednocześnie zmniejszeniu śladu węglowego miast. Wzmacnianie odporności miast na zmianę

klimatu nie musi polegać wyłącznie na rozwoju infrastruktury przez władze lokalne, ale także na roztrópnym korzystaniu z tego, co oferują ogrody i pola, tak entuzjastycznie pielęgnowane przez mieszkańców. Ogrodnictwo i rolnictwo miejskie we wszystkich swoich formach mają tę zaletę, że aktywizują mieszkańców do działań będących źródłem korzyści zewnętrznych. Mieszkańcy miast poprzez swoją pracę i pieniądze wydawane na zakładanie i utrzymanie ogrodów przyczyniają się do powstania dodatnich efektów zewnętrznych, istotnych z punktu widzenia ochrony i jednocześnie adaptacji do zmiany klimatu.

W Polsce dużym problemem w zakresie urbanizacji pozostaje brak konsekwentnego planowania rozwoju przestrzeni miejskiej oraz miejskich obszarów funkcjonalnych. Chociaż rośnie świadomość roli błękitno-zielonej infrastruktury w oddziaływaniu na jakość życia i dobrostan mieszkańców, wciąż obserwuje się pochopne wycinanie drzewostanów, zawłaszczanie terenów zielonych pod nową zabudowę i akceptację „betonozy”. Zasklepienie gleby prowadzi do jej degradacji oraz zmniejszenia retencji wody, a niedostateczne obszary zieleni, zwłaszcza zieleni wysokiej, przekładają się na nasilenie zjawiska miejskich wysp ciepła. Biorąc pod uwagę konieczność uwzględniania w planach rozwojowych miast kwestii klimatycznych, warto sięgać po sprawdzone w wielu miejscach na świecie wzorce, zwłaszcza gdy są one zgodne z polską tradycją i wychodzą naprzeciw potrzebom mieszkańców. Dodatkową spodziewaną korzyścią będzie obniżenie kosztów utrzymania miast, gdy w miejsce usług świadczonych przez spółki komunalne lub kupowanych na rynku, wejdą te świadczone przez ekosystemy.

Literatura:

- Aiken G. 2012. Community transition to Low Carbon Futures in the Transition Town Network (TTN). *Geography Compass* 6/2, 89-99. doi:10.1111/j.1749-8198.2011.00475.x.
- Allotment Gardens. Looking for a space to nurture your green fingers? <https://www.nparks.gov.sg/gardening/allotment-gardens> (dostęp w dn: 15.04.2022).
- Bakker N., Dubbeling M., Gündel S., Sabel-Koschella U., de Zeeuw H. 2000. Growing Cities, Growing Food: Urban agriculture on the Policy Agenda. A Reader on Urban Agriculture. Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung (DSE), Feldafing.
- Bezák P., Lyytimäki J. 2011. Complexity of urban ecosystem services in the context of global change, *Ekologia (Bratislava)*, Vol. 30, No. 1, 22-35. doi:10.4149/EKOL_2011_01_22.
- Birkhofer K., Diehl E., Andersson J., Ekroos J., Früh-Müller A., Machnikowski F., Mader V.L., Nilsson L., Sasaki K., Rundlöf M., Wolters V., Smith H.G. 2015. Ecosystem services—current challenges and opportunities for ecological research. *Frontiers in Ecology and Evolution*. doi:10.3389/fevo.2014.00087.
- Botzat A., Fischer L.K., Kowarik I. 2016. Unexploited Opportunities in Understanding Liveable and Biodiverse Cities. A Review on Urban Biodiversity Perception and Valuation. *Global Environmental Change*, Vol. 39. 220-233.
- Branas C.C., Cheney r.A., MacDonald J.M., Tam V.W., Jackson T.D., Have T.R. 2011. A difference-in differences analysis of health, safety, and greening vacant urban space. *American Journal of Epidemiology* 174(11), 296-1306. doi:0.1093/aje/kwr273.
- Burchard-Dziubińska M. 2021. The Role of Urban Gardening in Building City Resilience to Climate Change. *Ekonomia i Środowisko* nr 3, 32-43.
- CICES. 2015. Common International Classification of Ecosystem Services. Towards a common classification of ecosystem services. <http://cices.eu>. (dostęp w dn: 10.04.2022).

- Costanza r. i in. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, May 15, 253-260, <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
- Czembrowski P. 2016. The economic valuation of urban green spaces as a voice in the debate over their role in sustainable cities. *Economic and Environmental Studies* Vol. 3(39), 365-375.
- Czembrowski P., Kronenberg J. 2016. Hedonic Pricing and Ecosystem Services: Considering Different Urban Green Spaces types and Sizes. *Landscape and Urban planning*, Vol. 146., 11-19.
- De Groot r., Wilson M. A., Boumans r. M. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. Vol. 41, s. 393-408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.
- Dubel A. 2017. Porównanie wyceny walorów środowiska ekosystemu Błoń Krakowskich za pomocą kilku wybranych metod wyceny. W: *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*. Nr 478, 122-131.
- Ehrlich P. r., Ehrlich A. H. 1981. *Extinction. The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. New York, NY: Random House.
- Elmqvist T., Setälä H., Handel S.N., van der Ploeg S., Aronson J., Blignaut J.N., Gómez-Baggethun E., Nowak D.J., Kronenberg J., de Groot r. 2015. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability* Vol. 14, s. 101-108.
- Evans M.R., Norris K.J., Benton T.G. 2012. Predictive ecology: systems approaches. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B 367, 163-169. doi:10.1098/rstb.2011.0191.
- Giecwicz J. 2005. Obszary rolne jako czynnik przyrodniczej rewitalizacji miasta. W: *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych PAN*, t. I, 128-134.
- Giedych r., Latkowska M. 2015. Miejskie ogrody działkowe – przedmiot polskich badań naukowych w odniesieniu do programu COST TU 1201. W: *Ogród za oknem. Przyszłość ogrodów działkowych w miastach. „Sztuka ogrodu. Sztuka krajobrazu”* Vol. 3(13), 71-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616308952?via%3Dihub>.
- B., Hauschild M., Fernández J., Birkved M. 2016. Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates, *Journal of Cleaner Production*. Vol. 135, 984-994. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.004.
- Graczyk A. 2010. Świadczenia ekosystemów jako dobra ekonomiczne. *Ekonomia i Środowisko* nr 1(37), 64-76.
- Guitart D., Pickering C., Byrne J. 2012. Past results and future directions in urban community gardens research. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 364-373.
- GUS, Rocznik statystyczny 2019. Warszawa.
- GUS, Rocznik statystyczny 2021. Warszawa.
- Karczewski J. 2021. *Zobacz ptaka. Opowieści po drodze*. Wydawnictwo Poznańskie.
- Karwińska A., Böhm A., Kudłacz M. 2018. The phenomenon of urban sprawl in modern Poland: Causes, effects and remedie. *Zarządzanie Publiczne / Public Governance* nr. 3(45). doi:10.15678/ZP.2018.45.3.02.
- Klimat ryzyka. 2019. Polska Izba Ubezpieczeń, Deloitte Sustainability Consulting Central Europe, Warszawa.
- Kronenberg J., Bergier T., Lisicki P. 2013. Usługi ekosystemów w praktyce a ogrody działkowe. W: Kosmala M. (red.), *Ogrody działkowe w miastach – bariera czy wartość*. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń, 159-168.
- Kronenberg J., Łaszkiwicz E., Sziło J. 2021. Voting with one's chainsaw: What happens when people are given the opportunity to freely remove urban trees? *Landscape and Urban Planning* 209(1):104041. doi:10.1016/j.landurbplan.2021.104041.
- Krzyk P., Tokarczuk T., Heczko-Hyłowa E., Ziobrowski Z. 2013. Obszary rolne jako element struktury przestrzennej miast – problemy planistyczne. *Instytut Rozwoju Miast*. Kraków.

- Kurowski J.K., Witosławski P. 2009. Zielone skarby Łodzi – relikty naturalnej przyrody miasta. Wydział Ochrony Środowiska i Rolnictwa Urzędu Miasta Łodzi. Katedra Geobotaniki i Ekologii Roślin Uniwersytetu Łódzkiego.
- Lepczyk C.A., Aronson M.F.J., Evans K.L., Goddard M.A., Lerman S.B., MacIvor J.S. 2017. Biodiversity in the City: Fundamental Questions for Understanding the Ecology of Urban Green Spaces for Biodiversity Conservation. *BioScience*. Vol. 67.Issue 9, 799-807.
- Litwińska E. 2008. Zjawisko urban sprawl – jeden z wymiarów współczesnych procesów urbanizacji. W: *Współczesne kierunki i wymiany procesów urbanizacji* J. Słodczyk, M. Śmigielka (red.). Uniwersytet Opolski, Opole.
- Lorek A. 2019. Usługi ekosystemów w rozwoju zrównoważonym gmin regionu wysoko zurbanizowanego. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being. General Synthesis: a Report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press.
- Montoya J. M., Raffaelli D., 2010. Climate change, biotic interactions and ecosystem services. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B 365, 2013-2018. doi:10.1098/rstb.2010.0114.
- Mougeot L.J.A. 2006. *Growing Better Cities. Urban Agriculture for Sustainable Development*. International Development Research Centre. Ottawa.
- Nicholson E., Mace G.M., Armsworth P.R., Atkinson G., Buckle S., Clements T. 2009. Priority research areas for ecosystem services in a changing world. *Journal of Applied Ecology* Vol. 46, 1139-1144. doi:10.1111/j.1365-2664.2009.01716.x.
- Olaczek r. (red.). 2006. *Parki i ogrody Łodzi: Park im. Ks. Bp. Michała Klepacza*. Stowarzyszenie Film-Przyroda-Kultura. Łódź.
- Olaczek r. (red.). 2006. *Parki i ogrody Łodzi: Park Źródlika I*. Stowarzyszenie Film-Przyroda-Kultura. Łódź.
- Olaczek r. (red.). 2008. *Parki i ogrody Łodzi: Ogrody Księżego Młyna*. Stowarzyszenie Film-Przyroda-Kultura. Łódź.
- Olaczek r. (red.). 2010. *Parki i ogrody Łodzi: Ogrody nad Łódką*. Stowarzyszenie Film-Przyroda-Kultura. Łódź.
- Olaczek r. (red.). 2012. *Parki i ogrody Łodzi: Park Sienkiewicza. Park Moniuszki. Ogrody i zieleńce w centrum miasta*. Stowarzyszenie Film-Przyroda-Kultura. Łódź.
- Sikorski P. i in. 2021. The value of doing nothing – How informal green spaces can provide comparable ecosystem services to cultivated urban parks. *Ecosystem Services* nr 50.
- TEEB. 2011. *Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management*.
- Usuwanie drzew i krzewów oraz zagospodarowanie pozyskanego drewna. 2019. Raport NIK. Warszawa.
- Walker B. H., Salt D. 2006. *Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world*, Washington D.C., Island Press.
- Żylicz T. 2000. *Costing Nature in a Transition Economy: Case Study in Poland*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Żylicz T. 2020. Urban Greenery Management Problems. *Ekonomia i Środowisko*. 4(75).

Rozdział 2

Przekształcenia w sektorze energetycznym i zakładach produkcyjnych w kierunku zmniejszania emisyjności

prof. dr hab. inż. Janusz Wojdalski^{1,3}

dr hab. inż. Piotr F. Borowski, prof. AFiB²

dr hab. inż. Bogdan Drózd³

¹Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej; ²Akademia Finansów i Biznesu Vistula, Wydział Biznesu i Stosunków Międzynarodowych;

³SGGW w Warszawie, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Katedra Inżynierii Produkcji

Wstęp

Bezpieczeństwo energetyczne kraju, rozpatrywane wieloaspektowo, jest stanem gospodarki umożliwiającym pokrycie zapotrzebowania odbiorców na energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, z uwzględnieniem wymagań ochrony środowiska naturalnego. Ma to związek z ograniczaniem emisji gazów cieplarnianych oraz wprowadzeniem uprawnień do emisji CO₂. Celem reform realizowanych w energetyce jest zaszczepienie konkurencji na rynku energii, oddziałującej pozytywnie na aspekty gospodarcze, np. w postaci niższych cen energii elektrycznej, inwestycji w nowe moce wytwórcze, rozwój niskoemisyjnych technologii oraz zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju [Pach-Gurgul 2012]. Celem podjęcia tej tematyki jest również analiza wybranych uwarunkowań i omówienie konsekwencji dla środowiska wynikających z produkcji i przemian nośników energii w warunkach rosnącego zapotrzebowania na energię, ryzyka zapewnienia jej dostarczania oraz syntezy wyników badań energochłonności produkcji jednej z gałęzi przemysłu o krytycznym znaczeniu dla gospodarki.

Emisyjność dwutlenku węgla i innowacyjność przemysłu

W **tabeli 2.1** przedstawiono kształtowanie się emisji CO₂ na poszczególnych kontynentach ze szczególnym uwzględnieniem Europy. W Europie krajami o największej emisyjności CO₂ są Niemcy i Wielka Brytania, w skali globalnej zaś – Chińska Republika Ludowa, USA oraz Indie. Należy zaznaczyć, że Polska nie jest i nie była krajem o najwyższej emisji CO₂ do atmosfery, co nie oznacza, że nie powinniśmy wdrażać rozwiązań mających ograniczać negatywny wpływ na środowisko.

Tabela 2.1. Przykłady emisji CO₂ w skali międzynarodowej w 2020 r.

Państwo/lokalizacja	Masa* Mt
ChRL	10668
USA	4713
Indie	2442
Federacja Rosyjska	1577
Japonia	1031
Niemcy	644
Turcja	393
Wielka Brytania	330
Włochy	304
Polska	300
Kazachstan	291
Francja	277
Hiszpania	209
Łącznie na świecie	34807

*1Mt=1Tg

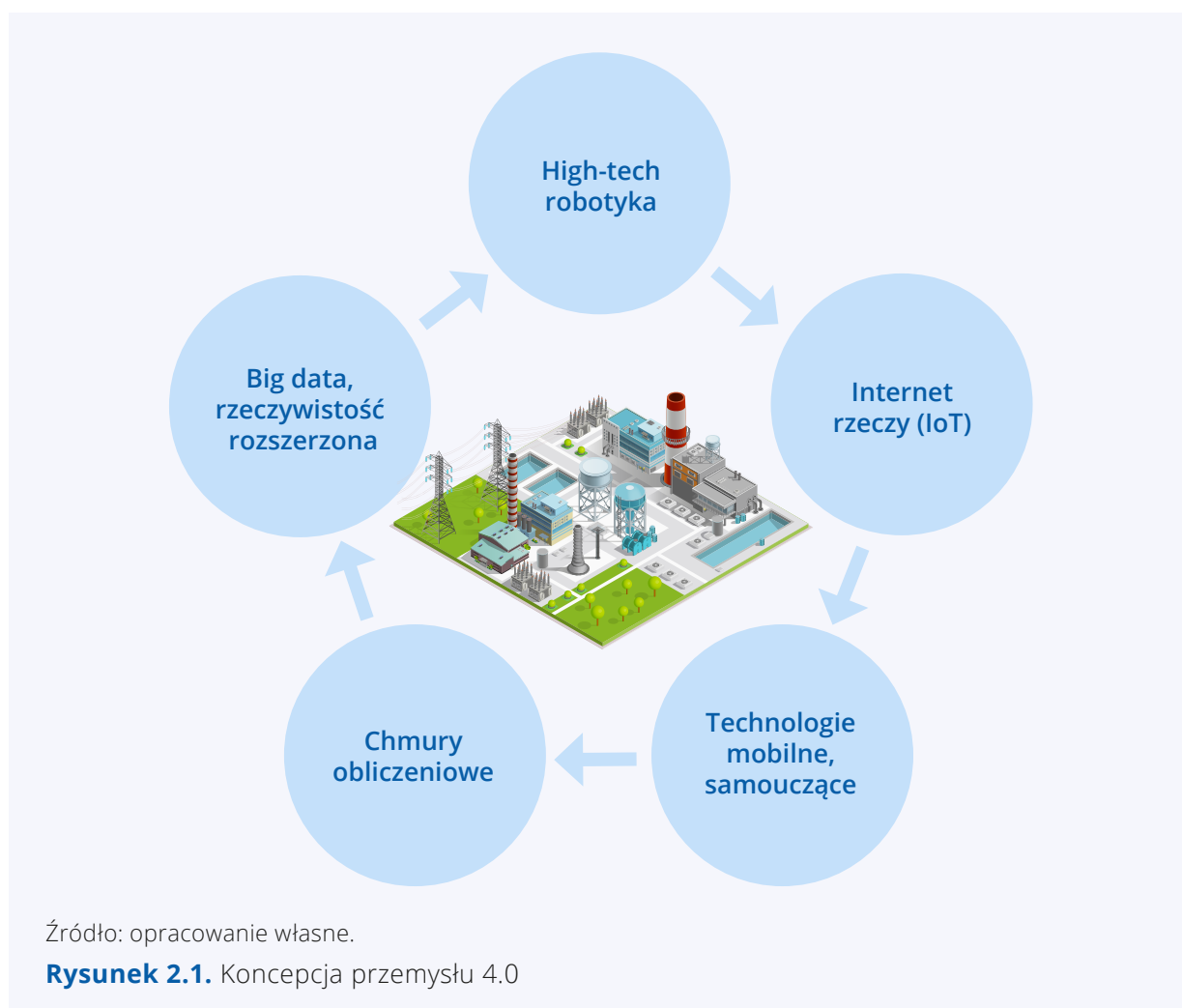
Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Global Carbon Atlas].

Emisyjność CO₂ sektora energetycznego jest zróżnicowana w poszczególnych krajach europejskich i wynosi maksymalnie 1,1 t CO₂/MWh. Najbardziej emisyjnym sektorem w polskiej gospodarce jest sektor elektrociepłowniczy [Skrzypek 2018]¹. Na podstawie danych przedstawionych w Raporcie [GHG emissions by sector 2022] można wnioskować, że w Europie w latach 1990-2016 najwyższy udział emisyjności przypadał na przemysł i transport. Największym źródłem emisji gazów cieplarnianych z działalności człowieka jest przede wszystkim spalanie paliw kopalnych przeznaczonych do produkcji energii elektrycznej, ciepła i w transporcie. Jednakże udział przemysłu w powstawaniu emisji CO₂ systematycznie maleje. Jest to związane m.in. z wdrażaniem innowacyjnych metod

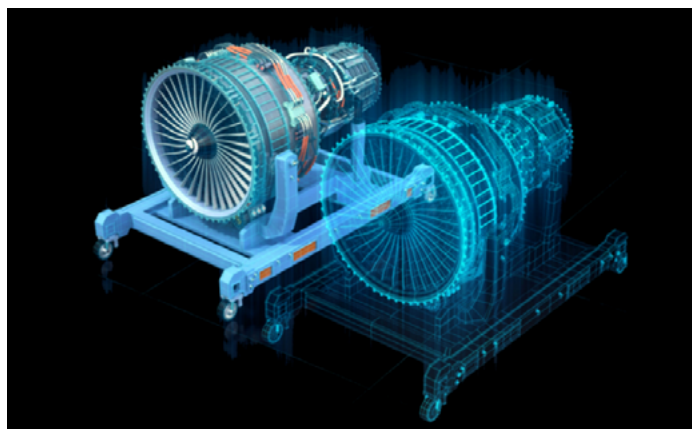
¹ Publikacja obejmuje podstawowe trendy zachodzące w zakresie energochłonności i emisyjności sektorów gospodarki w latach 1996-2015.

produkcji, np. digitalizacji oraz odchodzeniem od stosowania w przemyśle energochłonnych urządzeń na rzecz nowoczesnych rozwiązań techniczno-technologicznych [Borowski 2020; 2021] czy podążaniem za paradygmatem przemysłu 4.0. Czynniki te mają także wpływ na kształtowanie się śladów węglowych produktów, np. żywności [Kovacs i in. 2021; Rondoni, Grasso 2021].

Zarządzanie przedsiębiorstwami w sektorze energetycznym koncentruje się obecnie na kilku podstawowych działaniach, a mianowicie na cyfryzacji sektora [Varela 2018; Sheveleva i in. 2021] i jego rozwoju w kierunku zerowej emisji (dekarbonizacja) oraz zrównoważonym rozwoju [Kueppers i in. 2021]. Czwarta rewolucja przemysłowa nazywana jest od kilku lat gospodarką cyfrową czy też przemysłem 4.0. Rewolucja ta, podobnie jak poprzednie, charakteryzuje się zdolnością do przekształcania gospodarek i miejsc pracy, jak również wpływa na zmiany społeczeństw wraz z ich aktywizacją na rynku. Dokonuje się to przez wprowadzenie nowych technologii i procesów, w tym technologii cyfrowych. Wykorzystując kombinację inteligentnych urządzeń i maszyn, rozwiązania samouczące się i zwiększając możliwości samoukierunkowania, możliwe będzie obniżenie kosztów produkcji, przy jednoczesnym zwiększeniu elastyczności, jakości i szybkości produkcji w przemyśle 4.0, co przedstawiono na **rysunku 2.1**.



Cyfryzacja daje możliwość zmniejszenia energochłonności produkcji (zwiększenia efektywności energetycznej), dzięki technologiom zbierającym i analizującym dane. Dane te są przetwarzane na przydatne informacje za pomocą technologii analizy danych, takich jak algorytmy sztucznej inteligencji, a następnie wysyłane do urzędów, które mogą wpływać na zmiany fizyczne w celu optymalizacji zużycia energii [Rot i in. 2020]. Rozwój różnych technologii cyfrowych w sektorze energetycznym może zaspokoić rosnące zapotrzebowanie na energię oraz wspierać transformację w kierunku czystej energii oraz bardziej zrównoważonych i odnawialnych rozwiązań [Trzaska i in. 2021]. Systemy elektroenergetyczne na całym świecie przechodzą bezprecedensowe zmiany, a trendy decentralizacji i cyfryzacji przekształcają sektor energetyczny poprzez integrację odnawialnych zasobów, aby tam gdzie to możliwe spełnić postawione cele dekarbonizacji. Umiejętności dostosowania się do wymagań wynikających z otoczenia prawnego, ekologicznego czy technologicznego, pozwalają przedsiębiorstwom na wdrożenie w krótkim czasie nowych innowacyjnych rozwiązań funkcjonujących na rynku. Jeżeli przedsiębiorstwo ma umiejętność reagowania z wyprzedzeniem (tzw. adaptacja antycypacyjna) [Borowski 2019; 2020] i korzystania z różnych elastycznych procesów i integracji z systemami high-tech, to ma potencjał do tworzenia cyfrowego przedsiębiorstwa. Takie przedsiębiorstwo oparte jest na wirtualnej rzeczywistości i posiada zintegrowane rozwiązania ze świata automatyki i robotyzacji. Nowość obecnie prowadzonych badań dotyczy cyfryzacji, cyfrowych bliźniaków (digital twins) oraz najnowszych rozwiązań stosowanych w energetyce. Wiele rozwiązań jest już wdrażanych w niektórych sektorach, np. w przemyśle lotniczym (silniki w samolotach), lecz w przedsiębiorstwach energetycznych, w tym elektrowniach, są to rozwiązania innowacyjne. Wraz z rozwojem technologii wspomagających, takich jak rozwój 5G, Internet rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI) oraz wykorzystanie technologii blockchain, branża energetyczna przejdzie na stosowanie cyfrowych bliźniaków. Globalne wysiłki, jak również polityka rządu, skłania się ku lepszemu, oszczędniejszemu i bardziej wydajnemu wykorzystaniu energii w przemyśle. Zapewnia to obiecującą przyszłość dla rozwoju bliźniaków cyfrowych i systemu oszczędzania energii w przemyśle [Teng i in. 2021]. Cyfrowe bliźniaki są ważne dla zaprojektowania instalacji i systemów, jako symulacja (wykorzystywane we wszystkich aspektach od produkcji poprzez bezpieczeństwo pracy do organizacji) pomaga w badaniach i prowadzonych analizach. Koncepcję cyfrowego bliźniaka silnika wraz z jego elementami mechanicznymi przedstawiono na **rysunku 2.2**.



Źródło: [Digital Twins as a New IoT Milestone].

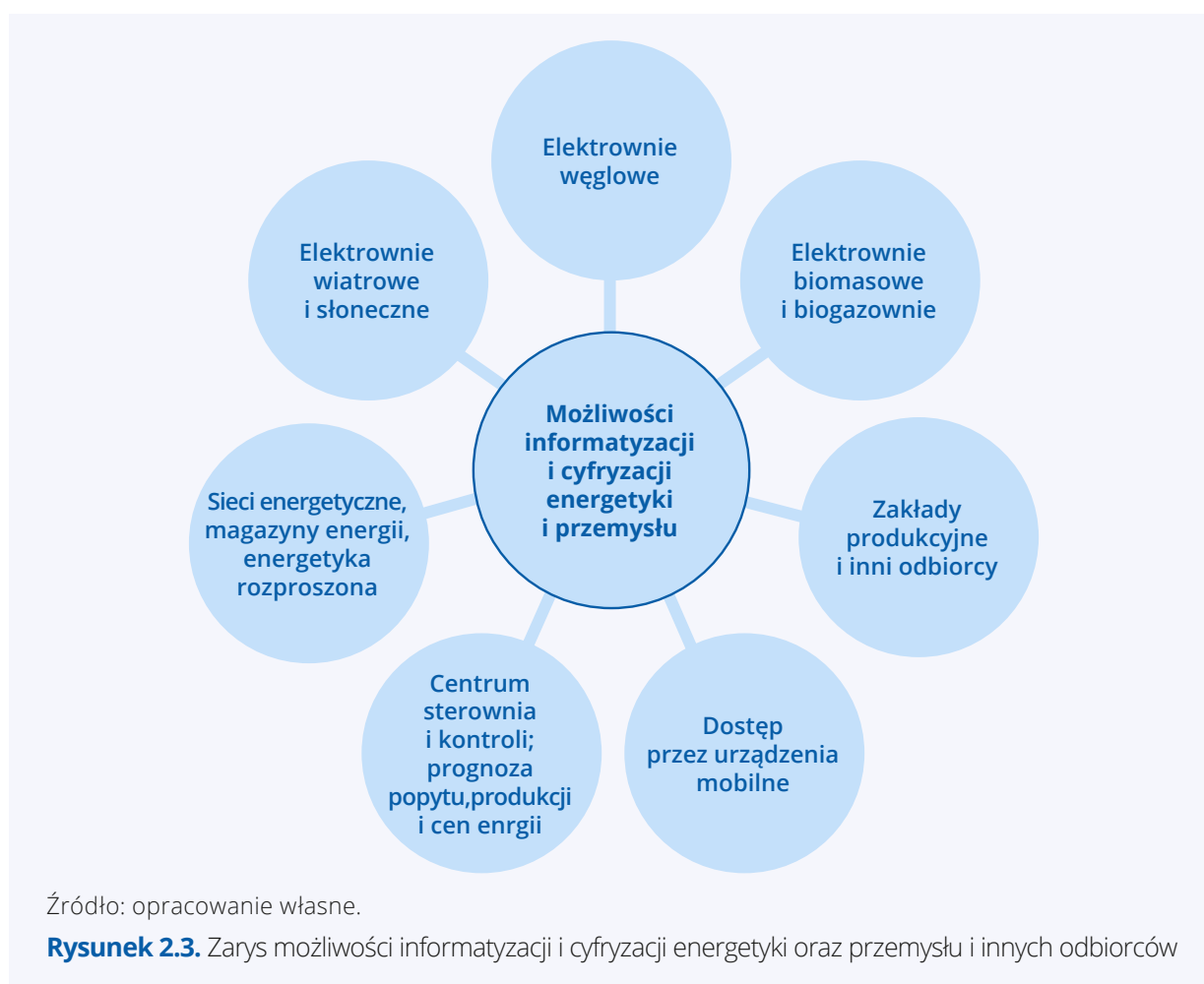
Rysunek 2.2. Rzeczywisty obiekt silnika i jego cyfrowy bliźniak

Podejście związane ze stosowaniem rozwiązań cyfrowych jest analogiczne do podejścia innowacyjnego, które można podzielić na innowację względną i innowację absolutną. Cyfrowe bliźniaki (digital twins) są na początkowym etapie zastosowania w energetyce jądrowej, dlatego zaklasyfikujemy je jako względne innowacje [Borowski 2021, Jiang i in. 2021]. Cyfrowe bliźniaki jest to koncepcja stworzenia cyfrowej repliki obiektu fizycznego (fizycznego bliźniaka) oraz synchronizacja danych między obiektem fizycznym a jego cyfrowym bliźniakiem w celu monitorowania, symulacji i optymalizowania obiektu fizycznego [Hou i in. 2021]. Cyfrowy bliźniak realizowany jest dzięki możliwości przetwarzania danych w czasie rzeczywistym oraz ciągłej aktualizacji stanu obiektów i procesów. Taki cyfrowy bliźniak służy do śledzenia budowy i identyfikacji problemów poprzez wizualizację zmian w czasie. Procesy te będą również zyskiwać na popularności wraz z rozwojem trendu inteligentnych fabryk [Borowski 2021]. Model w sposób autentyczny symuluje naturalne środowisko użytkownika produktu/sprzętu/obiektu i wszystkie procesy w trakcie jego pracy. Dzięki symulacji można dokładnie obserwować i przeanalizować, jak działa sprzęt (również z punktu widzenia kontroli), jak jest utrzymywany przez inżynierów. Rozwiązania digital twins stosowane w przedsiębiorstwach łączą w sobie uczenie maszynowe, sztuczną inteligencję i analizę oprogramowania z zebranymi danymi w zakładach produkcyjnych do tworzenia modeli symulacyjnych. Cyfrowe bliźniaki mogą symulować dowolne aspekty fizycznego obiektu lub całego procesu. Modele cyfrowe pozwalają na ciągłą aktualizację, gdy wymagają tego indywidualne parametry procesu produkcyjnego lub warunki pracy danego urządzenia.

Zagadnienia dekarbonizacji i innowacji

Dekarbonizacja i potrzeba wzrostu efektywności energetycznej, które są odpowiedzią na problemy ochrony środowiska i globalnego ocieplenia, wymagają wdrożenia odpowiednich strategii, podejmowania radykalnych decyzji promujących skuteczną i terminową zmianę systemów energetycznych [Kueppers i in. 2021; Manfren i in. 2021]. Zarówno w sektorze gospodarstw domowych, jak i w sektorze przemysłowym zapotrzebowanie na energię elektryczną stale rośnie, a społeczeństwo wywiera coraz większą presję na przemysł, aby ograniczył swój wpływ na środowisko. Wykorzystanie rozwiązań cyfrowych w energetyce przyczyni się do zwiększenia efektywności energetycznej, produktywności, a także redukcji kosztów – głównie dzięki wykorzystaniu sztucznej inteligencji (AI), rozwojowi zaawansowanych sensorów do monitorowania procesów oraz zapewnieniu zdalnego dostępu w różnych obszarach organizacyjnych [Trzaska i in. 2021]. Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji w energetyce umożliwi efektywne zarządzanie nie tylko przesyłem, ale także produkcją energii w ekosystemie tysięcy producentów i prosumentów [Borowski 2023]. Badania nad sztuczną inteligencją definiuje się jako badanie „inteligentnych agentów” oraz każdego urządzenia, które postrzega swoje otoczenie i podejmuje działania maksymalizujące jego szanse na pomyślne osiągnięcie zamierzonych celów [Park i in. 2019]. Innowacje technologiczne, redukcje kosztów, nowe modele biznesowe i polityki prorozwojowe przyspieszają przekształcanie tradycyjnej sieci energetycznej w sieć zdecentralizowaną, gdzie zarówno energia, jak i informacje przepływają w obie strony. Główne wyzwanie polega na tym, jak przekształcić potencjalnie destrukcyjne efekty dystrybucji energii z wielu źródeł w wydajny i opłacalny system uwzględniający zmniejszenie emisyjności przemian nośników energii. System energetyczny przyszłości może być drogą do równowagi między trzema kluczowymi wymogami: rozwojem

gospodarczym, powszechnym dostępem do bezpiecznych i niezawodnych dostaw oraz ograniczeniem emisji CO₂. Technologia umożliwia transformację, ale przełom w przyszłości będzie również wspierany przez radykalne zmiany zużycia energii przez konsumentów [Wujec 2020].



Na **rysunku 2.3** przedstawiono schemat funkcjonowania gospodarki opierającej się na informatyzacji i cyfryzacji, które pozwolą na wdrożenie rozwiązań bezpiecznych, inteligentnych oraz zrównoważonych. Dzięki możliwościom modelowania rozwiązań stosowanych w całym systemie możliwa będzie poprawa efektywności energetycznej, ponieważ symulatory pomogą wyeliminować krytyczne scenariusze, powodując obniżenie całkowitego kosztu cyklu życia obiektów w całym systemie.

Przedsiębiorstwa coraz częściej stosują normy dotyczące wzrostu efektywności energetycznej ISO 1400 i ISO 5001. Na szczególną uwagę zasługuje także coraz powszechniejsze stosowanie formuły ESCO (przedsiębiorstwo oszczędzające energię). Przedsiębiorstwa usług energetycznych (ESCO) mogą być skutecznymi instrumentami przezwyciężania niektórych barier we wdrażaniu rozwiązań prowadzących do wzrostu efektywności energetycznej [Recalde 2021]. Rosnące wykorzystanie odnawialnych źródeł energii i technologii wzrostu efektywności energetycznej jest jednym z trendów transformacji klimatycznej i zrównoważonego rozwoju zidentyfikowanych w sektorze przemysłowym [Kołodziejczyk 2021]. Zmniejszenie intensywności emisji dwutlenku węgla oraz poprawa efektywności w przemyśle w połączeniu z innowacyjnymi rozwiązaniami pozytywnie wpływa na sytuację

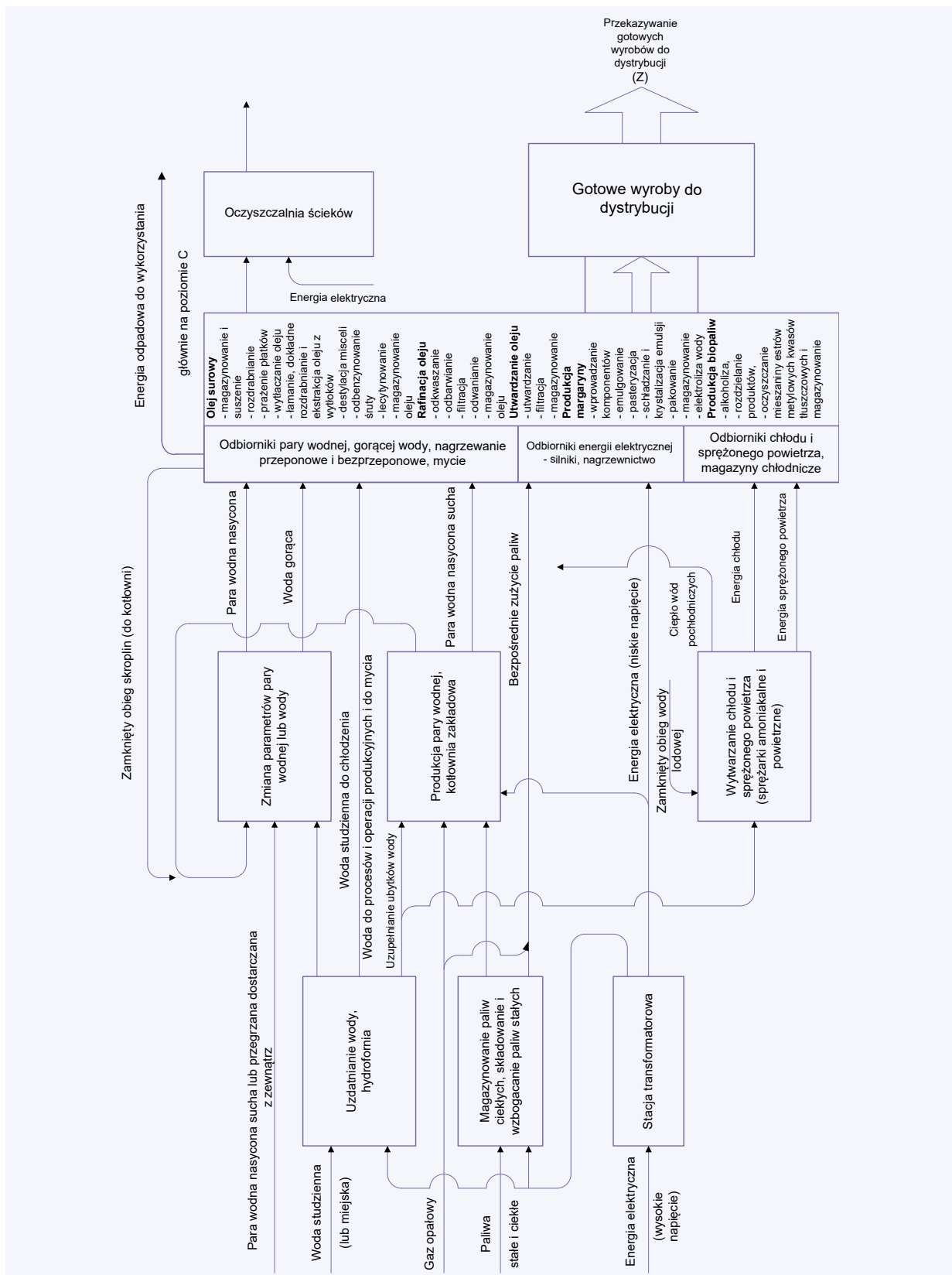
klimatyczno-energetyczną [Silvestre, Țîrcă 2019; Borowski 2022]. W wielu ośrodkach prowadzone są badania dotyczące działań podejmowanych przez przedsiębiorstwa w celu spełnienia wymagań środowiskowych i technologicznych. Przedsiębiorstwa produkujące energię poszukują innowacyjnych rozwiązań, które zapewnią zmniejszenie bądź całkowite wyeliminowanie emisyjności CO₂, stosując biomasę jako paliwo [Borowski 2022] lub wykorzystując ogniwa wodorowe w procesie produkcji energii i ciepła. Od strony technologicznej zwraca się uwagę na wzrost efektywności energetycznej, poprzez zastosowanie technik ADP (Advanced Digital Production) i AMT (Additive Manufacturing Technologies) oraz cyfryzację sektora (elektrownie wirtualne, blockchain, cyfrowe bliźniaki). W aspekcie środowiskowym zwraca się uwagę na działania Unii Europejskiej związane z dekarbonizacją, ograniczeniem szkodliwego wpływu na środowisko oraz zmniejszeniem zużycia energii.

W ciągu ostatnich dwóch dekad wiele gospodarek i rządów w coraz większym stopniu koncentrowało się na inwestowaniu w rozwiązania wpływające na wzrost efektywności energetycznej. Podejmowane działania dotyczą głównie doskonalenia procesów produkcyjnych, modernizacji urządzeń i budynków oraz wprowadzania nowych technologii. Programy wzrostu efektywności energetycznej przemysłu stały się jedną z najpopularniejszych polityk rządowych ukierunkowanych na zmniejszenie zużycia energii w energochłonnych gałęziach przemysłu i przetwórstwie żywności mającym krytyczne znaczenie dla funkcjonowania gospodarki [Borowski, Karlikowska B. 2023; Chang i in. 2018; Clairand i in. 2020; Safarzadeh i in. 2020; Wojdalski, Drożdż 2012; Wojdalski i in. 2013; 2015]. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że koszty energii produkowanej i dystrybuowanej za pośrednictwem scentralizowanego systemu energetycznego stają się coraz wyższe. Ma to istotny wpływ na poziom kosztów produkcji zwłaszcza nawozów i komponentów dla rolnictwa oraz żywności i produktów przetwórstwa. W tym kontekście należy dodać, że zakres pojęciowy energetyki rozproszonej jest silnie skorelowany ważnym czynnikiem jakim jest gospodarka żywnościowa, będąca elementem biogospodarki [Wojdalski i Niżnikowski 2019]. Strategia rozwoju energetyki rozproszonej powinna obejmować łącznie bezpieczeństwo energetyczne i żywnościowe, gdyż są ze sobą ściśle połączone. Z tego względu poniżej przedstawiono także energetyczne aspekty przetwórstwa rolno-spożywczego.

Energochłonność produkcji na przykładzie wybranej gałęzi przemysłu

W Polsce jedną z gałęzi przemysłu dostarczających artykułów pierwszej potrzeby jest przetwórstwo rolno-spożywcze obejmujące 21 branż. Koszty przetwarzania i konserwacji żywności mają istotny związek z energochłonnością i efektywnością energetyczną produkcji. Woda używana w zakładach tego przemysłu jest traktowana jako surowiec do produkcji oraz nośnik energii [Wojdalski i in. 2013, 2015b]. Na **rysunku 2.4** przedstawiono schemat zakładu przetwórstwa rolno-spożywczego jako użytkownika nośników energii². Schemat przedstawia przepływy nośników energii w zakładzie produkcyjnym stanowiącym złożony system energo-technologiczny.

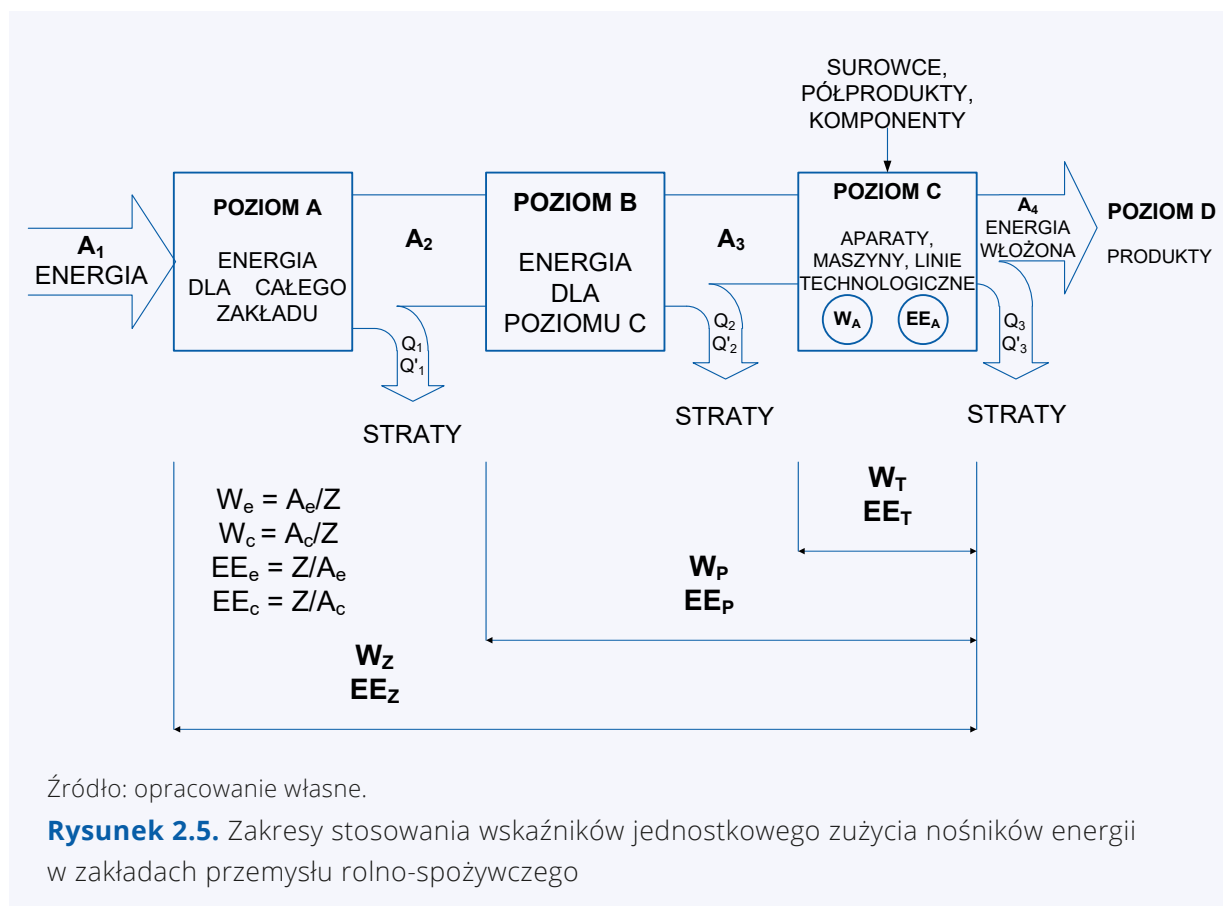
² Schemat przedstawiono ze względu na przetwórstwo nasion oleistych na cele spożywcze i niespożywcze/energetyczne do produkcji biokomponentów. Analogiczne schematy zakładów branż mięsnej i cukierniczej przedstawiono w pracach Wojdalskiego i in. [2013, 2015a].



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2.4. Zakład przemysłu rolno-spożywczego jako użytkownik nośników energii (na przykładzie zakładu przetwórstwa nasion oleistych)

Na **rysunku 2.5** przedstawiono wykres pasmowy uwzględniający przemiany na poszczególnych przyjętych poziomach odniesienia przedstawionych na **rysunku 2.4** oraz straty energii (Q_n) powstające na etapach/poziomach przemian energetycznych, jak również sumaryczne straty na poziomie wskaźnika zakładowego.



Przedstawiony schemat na **rysunku 2.5** wyodrębnia następujące poziomy użytkowania energii:

- A. **Zasilanie w nośniki energii.** Na tym poziomie dokonuje się pomiarów zużycia nośników energii niezbędnych do wyznaczenia zakładowych wskaźników (W_z) jednostkowego zużycia energii (W_e, W_c) oraz efektywności energetycznej (EE_z) stanowiących odwrotność wymienionych wskaźników energochłonności produkcji.
- B. **Przemiany nośników energii i dalsza transformacja parametrów z poziomu A.** Poziom obejmuje produkcyjny wskaźnik jednostkowego zużycia energii (W_p) i efektywności energetycznej (EE_p). Wyszczególnione obiekty tego poziomu występują w zależności od specyficznych cech branży. Występują tu możliwości skojarzonej gospodarki energetycznej, np. elektrociepłownie w zakładach cukrowniczych, ziemniaczanych i piwowarskich. Nadwyżka produkowanej energii może być sprzedawana do sieci krajowej.

- C. **Użytkowanie nośników energii.** Na tym poziomie są stosowane urządzenia specyficzne dla poszczególnych branż. Poziom ten obejmuje energię końcową wprowadzoną do procesów i operacji produkcyjnych bez dalszego przetworzenia jej nośników na inne nośniki energii (np. paliwo zużyte w suszarce, olej napędowy w środku transportu, woda gorąca w wymienniku ciepła, ciepło w parze wodnej, praca mechaniczna, „zimno”, oświetlenie, wytworzenie podciśnienia). W zakładach cukrowniczych poziom ten może być znacznie rozbudowany ze względu na wykorzystanie energii cieplnej odprowadzanej z wyparek. Z tego względu wykres Sankey'a może uwzględniać wielokrotne wykorzystanie energii. Obejmuje zakres technologicznego wskaźnika jednostkowego zużycia energii (W_T). Węższy zakres obejmują wskaźniki agregatowe wyrażające energochłonność W_A poszczególnych maszyn i aparatów tworzących linię technologiczną oraz odpowiednio efektywności energetyczne (EE_T i EE_A). W celu poprawy efektywności energetycznej można posługiwać się zaleceniami listy ZUM³.
- D. **Energia wykorzystana.** Odpowiada użytecznie wykorzystanej energii niezbędnej (energii włożonej A_d) do uzyskania produktu finalnego (Z) w zakładzie produkcyjnym. Jest równocześnie teoretycznym poziomem odniesienia dla energii wprowadzonej na poziom A.

W tabelach 2.2 i 2.3 przedstawiono zakresy zakładowych wskaźników energochłonności produkcji w branżach przemysłu rolno-spożywczego na podstawie wieloletnich badań. Przedstawione wskaźniki energochłonności produkcji umożliwiają oszacowanie emisyjności i śladu węglowego produktów z poszczególnych branż tego przemysłu, przydatnych w doborze innowacji technologicznych, zwłaszcza energooszczędnych rozwiązań możliwych do zastosowania na poziomie C (rysunek 2.5). Zmniejszanie liczby przemian nośników energii na poszczególnych poziomach A-C może prowadzić do zmniejszania strat Q_n i wzrostu efektywności energetycznej produkcji. Równocześnie zakresy zmienności przedstawionych wskaźników wskazują na możliwości zarówno zmniejszania energochłonności (wzrostu efektywności) produkcji, jak i oszacowania emisji oraz emisyjności CO₂ wynikającej z marnotrawstwa poszczególnych produktów spożywczych.

³ Lista zielonych urządzeń i materiałów które spełniają wymagania techniczne określone w programie „Czyste Powietrze”. Lista ZUM (ios.edu.pl) stanowi pomoc w wyborze urządzeń i materiałów kwalifikujących się do dofinansowania. Jest współtworzona przez producentów. W celu wpisania urządzenia/materiału na listę wymagana jest rejestracja przez producenta lub inny podmiot posiadający upoważnienie producenta do zgłoszenia materiału/urządzenia na listę. Finalnym celem jest m.in. poprawa efektywności energetycznej przedsiębiorstwa lub wdrożenie technologii w obszarze odnawialnych źródeł energii; [Wsparcie dla przemysłu energochłonnego – Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – Portal Gov.pl (www.gov.pl); Nabór IV wniosków 2023-2024 – Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – Portal Gov.pl (www.gov.pl)].

Tabela 2.2. Zakładowe wskaźniki jednostkowego zużycia energii elektrycznej (W_e) w przetwórstwie rolno-spożywczym

Branża, zakłady produkcyjne		Wymiar	Wartości liczbowe wskaźników	
			zakres	średnio
Zakłady cukrownicze (produkcja cukru)	kWh/Mg buraków	20–60	30	
	kWh/Mg cukru	120–510	240	
	kWh/Mg buraków	26–36	30	
Zakłady cukiernicze (produkcja słodyczy)	kWh/Mg produktów	195,2–353,5	256,6	
Zakład mięsny (bez ubojni)	kWh/Mg produktu	43–101	82	
Zakład mięsny (pełny profil)		177–227	207	
Zakłady mleczarskie	z proszkownią mleka	kWh/dm ³ mleka	–	41,7 i 50,7*
	bez proszkowni mleka	kWh/dm ³ mleka	–	39,5 i 39,9*
	bez produkcji mleka spożywczego i galanterii mlecznej	kWh/dm ³ mleka	–	37,9 i 42,8*
	produkcja mleka spożywczego i galanterii mlecznej	kWh/dm ³ mleka	–	32,1 i 30,7*
Zakłady owocowo-warzywne	kWh/Mg surowców	50–9650	720	
		22,1–1462,9	571,9	
	kWh/Mg mrożonych produktów	–	506,15	
Zakłady piwowarskie	kWh/hl piwa	7–20	10	
Zakłady drobiarskie	kWh/100 szt. ptaków	60–820	210	
	kWh/Mg produktu	290–2400	710	
	kWh/Mg produktu	–	200	
	kWh/Mg produktu	225–249	–	
Zakłady utylizacyjne	kWh/Mg surowców	30–120	60	
	kWh/Mg produktu	90–290	160	
Zakłady przetwórstwa rybnego	kWh/Mg konserw rybnych	150–190	–	
	kWh/Mg mączki rybnej	32		
Zakłady ziemniaczane (skrobiowe)	kWh/Mg ziemniaków	60–400	130	
	kWh/Mg skrobi	290–2300	830	
	kWh/Mg glukozy krystalicznej	61,6–357,3	103	
	kWh/Mg glukozy bezwodnej	503–4272	2540	
	kWh/Mg maltodekstryny	153–3220	315	
	kWh/Mg skrobi ziemniaczanej	161– 777	388	

Branża, zakłady produkcyjne	Wymiar	Wartości liczbowe wskaźników	
		zakres	średnio
Zakłady spirytusowo-drożdżowe (bez gorzelni)	kWh/hl spirytusu rektyfikowanego	10-180	40
Gorzelnie rolnicze	kWh/hl produkowanego alkoholu	6-60	20
Zakłady przetwórstwa nasion oleistych	kWh/Mg nasion oleistych	60-240	130
	kWh/Mg oleju rafinowanego	170-440	290
Zakłady przetwórstwa nasion oleistych	kWh/Mg nasion oleistych	48,3-212,4	-
Zakłady zbożowo-młynarskie	kWh/Mg ziarna	65-79	72
	kWh/Mg mąki	101-118	109
Zakłady zbożowo-młynarskie	kWh/Mg ziarna	47,6-104,8	-
	kWh/Mg mąki	70,4-129,3	-
Zakłady produkcji napojów bezalkoholowych	kWh/1000 szt. butelek	12,5-20,0	-
	kWh/1000 l	5,1-101,4	38,2
Zakłady paszowe	kWh/Mg produktu (mieszalnie pasz)	-	8,47 i 12,10
	kWh/Mg mieszanki	20,2-26,1	23,6
Zakłady chłodnicze	zużycie energii na jednostkę kubatury dla okresu dobowego kWh/m ³	0,21-0,42	-
Zakłady piekarskie	kWh/Mg pieczywa	10-77	-
		66,9-241,9	124,9
Zakład zielarski	kWh/kg produktu	1,67-3,88	2,10
Przetwórstwo herbaty	kWh/kg czarnej herbaty	0,42 - 1,08	0,64
Zakład produkcji koncentratów spożywczych (ketchup, majonez i musztarda)	kWh/Mg surowca	62,5-95,8	71,4
Zakład produkcji koncentratów spożywczych (suszone owoce, musli, batony zbożowe)	kWh/Mg	80-190	35,6
Zakład przetwórstwa ziarna kawowego (palarnia kawy) **	kWh/Mg ziarna kawy	289,8-504,8	-

* zależnie od pory roku, tj. odpowiednio lato i zima

** mała palarnia kawy o średniej wydajności 3,65 Mg ziarna kawy/miesiąc

Źródło: Dane wejściowe na podstawie [Wojdalski i Dróżdź 2021].

Tabela 2.3. Zakładowe wskaźniki jednostkowego zużycia ciepła (W_c) w przetwórstwie rolno-spożywczym

Branża, zakłady produkcyjne		Wymiar	Wartości liczbowe wskaźników	
			zakres	średnio
Zakłady cukrownicze (produkcja cukru)	GJ/Mg buraków	0,10–2,68	1,18	
	GJ/Mg cukru	0,85–21,2	9,78	
	kg paliwa umownego/100 kg buraków	3,5–5,0	4,5	
	kg paliwa umownego/100 kg buraków	3,1–7,8	4,7	
Zakłady cukiernicze (produkcja słodyczy)	MJ/Mg produktu	1517–7553	2795	
Zakłady mięsne	GJ/Mg ubitego żywca	5,89–58,1	12,9	
	GJ/Mg produktów jadalnych	do 220	24,5	
	GJ/Mg produktów jadalnych	1,66–2,85	2,23	
Zakłady mleczarskie	ogółem	0,12–14,00	2,01	
	z proszkownią mleka	–	2,32 i 3,41*	
	bez proszkowni mleka	–	1,36 i 2,47*	
	bez produkcja mleka spożywczego i galanterii mlecznej	GJ/1000 l przerabianego mleka	–	1,55 i 2,91*
	produkcja mleka spożywczego i galanterii mlecznej		–	1,09 i 1,75*
Zakłady owocowo-warzywne	GJ/Mg surowca	do 32,4	8,33	
		0,20–45,67	5,68	
Zakłady piwowarskie	GJ/hl piwa	0,04–0,53	0,25	
Zakłady paszowe	MJ/Mg mieszanki	1,66–2,85	2,23	
Zakłady drobiarskie	GJ/100 szt. ptaków	0,35–5,14	3,77	
	GJ/Mg produktu	1,95–19,00	9,58	
Zakłady utylizacyjne	GJ/Mg surowców	3,12–4,74	3,77	
	GJ/Mg produktu	8,24–12,10	9,58	
	GJ/Mg żelatyny	18,00–24,66	22,39	
Zakłady ziemniaczane (skrobiowe)	GJ/Mg ziemniaków	0,26–21,90	3,25	
	GJ/Mg skrobi	1,29–28,7	12,40	
	GJ/Mg glukozy krystalicznej	2,10–6,18	3,671	
	GJ/Mg glukozy bezwodnej	1,77–18,21	7,32	
	GJ/Mg maltodekstryny	5,96–19,55	8,59	
	GJ/Mg skrobi ziemniaczanej	11,80–167,68	52,22	
Zakłady spirytusowo-drożdżowe (bez gorzelnii)	GJ/hl produkowanego alkoholu	0,10–2,71	1,04	

Branża, zakłady produkcyjne	Wymiar	Wartości liczbowe wskaźników	
		zakres	średnio
Gorzelnie rolnicze	MJ/(dm ³ alk. 100%) (wskaźnik WZ dot. przerobu ziemniaków)	–	21,2
	MJ/(dm ³ alk. 100%) (wskaźnik WT przy 0,294 dm ³ /kg kukurydzy)	–	12,74
Zakłady przetwórstwa nasion oleistych	GJ/Mg nasion oleistych	1,29–5,67	3,32
	GJ/Mg oleju rafinowanego	4,93–11,50	7,60
	GJ/Mg nasion oleistych	1,36–8,36	–
Zakłady produkcji napojów bezalkoholowych	GJ/1000 szt. butelek	0,28–1,01	–
	GJ/1000 l	0,11–0,68	0,25
	dm ³ oleju opałowego lekkiego/ hl	–	0,0142
Zakłady piekarskie	GJ/Mg pieczywa	3,0–6,2	–
	GJ/Mg pieczywa	1,18–7,02	3,28
Zakład zielarski	MJ/kg produktu	14,4–65,8	21,7
Zakład produkcji koncentratów spożywczych (ketchup, majonez i musztarda)	MJ/Mg surowca	199,0–589,2	338,0
Zakład produkcji koncentratów spożywczych (suszone owoce, musli, batony zbożowe)	m ³ gazu opałowego/Mg produktu	1,37–5,48	2,52
Zakład przetwórstwa ziarna kawowego (palarnia kawy) **	dm ³ oleju opałowego/Mg ziarna kawy	–	42,04
	GJ/Mg ziarna kawy	5,63–8,49	6,60

* zależnie od pory roku (odpowiednio lato i zima)

** mała palarnia kawy o średniej wydajności 3,65 Mg ziarna kawy/miesiąc

Źródło: Dane wejściowe na podstawie [Wojdalski i Drózd 2021].

Podsumowanie

Zmniejszenie emisyjności staje się coraz ważniejsze dla przedsiębiorstw oraz gospodarki. Strategie efektywnych rozwiązań wymagają podejścia do redukcji emisji z punktu widzenia całego zakładu, gdzie wytwarzanie i wykorzystanie źródeł emisji powinno być poprawnie zbilansowane. Redukcja emisji ma wymiar zarówno procesowy, jak i środowiskowy. Bezpieczeństwa energetyczne i żywnościowe są ze sobą ściśle powiązane. Z tego względu strategia rozwoju energetyki rozproszonej powinna służyć zarówno bezpieczeństwu żywnościowemu, jak i zmniejszeniu emisji CO₂. Zróżnicowana energochłonność produkcji w obrębie tych samych branż świadczy też o możliwościach oszczędzania energii. Wzrost efektywności energetycznej przetwórstwa rolno-spożywczego można także osiągnąć poprzez wprowadzanie innowacji polegających m.in. na zmniejszeniu strat odbiorników energii cieplnej, co prowadzi do zmniejszenia emisji CO₂.

Literatura:

- Borowski P. 2021. Digitization, digital twins, blockchain, and Industry 4.0 as elements of management process in enterprises in the energy sector. *Energies*, 14(7), 1885.
- Borowski P.F. 2019. Adaptation strategy on regulated markets of power companies in Poland. *Energy & Environment*, 30, 3-26.
- Borowski P.F. 2020. New Technologies and Innovative Solutions in the Development Strategies of Energy Enterprises. *Hightech Innovation Journal*, 1, 39-58.
- Borowski P.F. 2022. Management of Energy Enterprises in Zero-Emission Conditions: Bamboo as an Innovative Biomass for the Production of Green Energy by Power Plants. *Energies*, 15(5), 1928.
- Borowski P.F. 2023. Digital Transformation and Prosumers Activities in the Energy Sector. *Intelligent Systems in Digital Transformation*. Kahraman C., Haktanir E (Eds.), Springer: Cham, Switzerland.
- Borowski P.F., Karlikowska B. 2023. Clean Hydrogen Is a Challenge for Enterprises in the Era of Low-Emission and Zero-Emission Economy. *Energies*, 16(3), 1171.
- Chang C.P., Wen J., Zheng M., Dong M., Hao Y. 2018. Is higher government efficiency conducive to improving energy use efficiency? Evidence from OECD countries. *Econ. Model.* 72, 65-77.
- Clairand J. M., Briceño-León M., Escrivá-Escrivá G., Pantaleo A. M. (2020). Review of energy efficiency technologies in the food industry: trends, barriers, and opportunities. *IEEE Access*, 8, 48015-48029.
- GHG emissions by main sector. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/ghg-emissions-by-main-sector> (dostęp w dn.: 10.10.2022).
- Global Carbon Atlas 2021. <http://globalcarbonatlas.org/en/content/welcome-carbon-atlas/> (dostęp w dn.: 10.10.2022).
- Hou L., Wu S., Zhang G.K., Tan Y., Wang X. 2021. Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety. *Applied Sciences*, 11, 339.
- Jiang Y., Yin S., Li K., Luo H., Kaynak O. 2021. Industrial applications of digital twins. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2207), 20200360.
- Digital Twins a New IoT Milestone. <https://hqsoftwarelab.com/%20blog/digital-twins/%20%20> (dostęp w dn.: 02.11.2022).
- Kovacs B., Miller L., Heller M.C., Rose D. 2021. The carbon footprint of dietary guidelines around the world: a seven country modeling study. *Nutrition Journal*, 20(1), 1-10.
- Kueppers M., Pineda S.N.P., Metzger M., Huber M., Paulus S., Heger H.J., Niessen S. 2021. Decarbonization pathways of worldwide energy systems – Definition and modeling of archetypes. *Appl. Energy*, 285, 116438.
- Manfren M., Sibilla M., Tronchin L. 2021. Energy Modelling and Analytics in the Built Environment – A Review of Their Role for Energy Transitions in the Construction Sector. *Energies*, 14, 679.
- Pach-Gurgul A. 2012. Jednolity rynek energii elektrycznej w Unii Europejskiej a bezpieczeństwo energetyczne Polski. Difin.
- Park S., Lee S., Park S., Park S. 2019. AI-Based Physical and Virtual Platform with 5-Layered Architecture for Sustainable Smart Energy City Development. *Sustainability*, 11(16):4479. <https://doi.org/10.3390/su11164479>.
- Kołodziejczyk Ł. 2021. Efektywność energetyczna, elektryfikacja i inwestycje VC w startupy sektora OZE – te trendy inwestycyjne zdominują sektor energii <https://strefainwestorow.pl/artykuly/oze/20210629/efektywnosc-energetyczna-startupy-sektora-oze> (dostęp w dn.: 01.11.2022).
- Rot A., Sobińska M., Hernes M., Franczyk B. 2020. Digital Transformation of Public Administration Through Blockchain Technology. *Towards Industry 4.0 – Current Challenges in Information Systems*. *Studies in Computational Intelligence*; Hernes, M., Rot, A., Jelonek, D., (Eds.). Springer: Cham, Switzerland, Volume 887.

- Recalde M.Y. 2021. Which aspects may prevent the development of energy service companies? The impact of barriers and country – specific conditions in different regions. *Energy Services Fundamentals and Financing*. Academic Press: New York, NY, USA, 293-315.
- Rondoni A., Grasso S. 2021. Consumers behaviour towards carbon footprint labels on food: A review of the literature and discussion of industry implications. *J. Clean. Prod.* 301, 127031.
- Safarzadeh S., Rasti-Barzoki M., Hejazi S.R. 2020. A review of optimal energy policy instruments on industrial energy efficiency programs, rebound effects, and government policies. *Energy Policy*, 139, 111342.
- Sheveleva A., Tyaglov S., Khaite P. 2021. Digital Transformation Strategies of Oil and Gas Companies: Preparing for the Fourth Industrial Revolution. *Digital Strategies in a Global Market* Palgrave Macmillan. Springer: Cham, Switzerland, 157-171.
- Silvestre B.S. Țîrcă D.M. 2019. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *J. Clean. Prod.* 208, 325-332.
- Skrzypek J. 2018. Analiza energochłonności i emisyjności sektorów polskiej gospodarki w latach 1996-2015. *Studia Oeconomica Posnaniensia*, 6(9), 78-103.
- Teng S.Y., Touš M., Leong W.D., How B.S., Lam H.L., Máša V. 2021. Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital twins and infrastructures. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 135, 110208.
- Trzaska r., Sulich A., Organa M., Niemczyk J., Jasiński B. 2021. Digitalization Business Strategies in Energy Sector: Solving Problems with Uncertainty under Industry 4.0 Conditions. *Energies*, 14(23):7997. <https://doi.org/10.3390/en14237997>.
- Varela I. 2018. Energy Is Essential, but Utilities? Digitalization: What Does It Mean for the Energy Sector? *Digital Marketplaces Unleashed*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 829-838.
- Wojdalski J., Drózd B. (red.). 2021. Przetwórstwo rolno-spożywcze i biogospodarka. Wybrane zagadnienia inżynieryjno-produkcyjne, biotechniczne, energetyczne i środowiskowe. SGGW, Warszawa, 245-286.
- Wojdalski J., Drózd B. 2012. Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego. Zarys problematyki i podstawowe definicje. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 3, 37-49.
- Wojdalski J., Drózd B., Piechocki J., Gaworski M., Zander Z., Marjanowski J. 2013. Determinants of water consumption in the dairy industry. *Polish Journal of Chemical Technology*, 15(2), 61-72.
- Wojdalski J., Niżnikowski R. 2019. Biogospodarka, pasze, biogaz – wybrane zagadnienia w kontekście zrównoważonego rozwoju. *Przegląd Hodowlany*, 87(2), 15-24.
- Wojdalski J., Niżnikowski R., Krajewski K., Drózd B., Sulima P. 2021. Ekoefektywność jako kryterium oceny inwestycji proekologicznych. *Przegląd Hodowlany*, 89.3, 22-26.
- Wojdalski J., Grochowicz J., Drózd B., Bartoszevska K., Zdanowska P., Kupczyk A., Wójcik G. 2015a. Energy efficiency of a confectionery plant – Case study. *Journal of Food Engineering*, 146, 182-191.
- Wojdalski J., Drózd B., Grochowicz J., Magryś A., Ekielski A. 2013. Assessment of energy consumption in a meat-processing plant – a case study. *Food and Bioprocess Technology*, 6.10, 2621-2629.
- Wojdalski J., Żelaziński T., Konieczny P., Drozd B., Kupczyk A., Goliś E., Mruk r. 2015b. Uwarunkowania gospodarki energią, wodą i środowiskiem w wybranych branżach przemysłu rolno-spożywczego oraz zarys problematyki zrównoważonego rozwoju. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 1(1), 40-51.
- Wujec A. 2020. Jak cyfryzacja wspiera efektywność energetyczną? <https://wysokienapiecie.pl/29031-jak-cyfryzacja-wspomaga-efektywnosc-energetyczna/> (dostęp w dn.: 10.10.2022).

Rozdział 3

Recykling energetyczny – analiza parametrów strumieni odpadów w postaci alternatywnego paliwa RDF

dr inż. Piotr Brożek

Politechnika Morska w Szczecinie, Wydział Mechatroniki i Elektrotechniki

■ Wstęp

Okolo 80% globalnego zużycia energii na świecie pochodzi z paliw kopalnych. Ich spalanie wpływa negatywnie na ludzi i otaczające ich środowisko z powodu wysokiej i stale zwiększającej się emisji dwutlenku węgla (CO_2), tlenków azotu (NO_x) i dwutlenku siarki (SO_2). Rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie recyklingu jako metody ograniczającej negatywne skutki i zapobiegającej niedoborom zasobów energetycznych [Balat 2008].

Każdemu jednemu procentowi (1%) wzrostu dochodu narodowego dowolnego kraju odpowiada 0,69% wzrostu ilości wytwarzanych odpadów [Białowiec i in. 2018]. Wzrost zapotrzebowania na energię, stale zwiększające się ilości wytwarzanych odpadów oraz powolne wyczerpywanie możliwych do wydobycia paliw kopalnych to trzy najważniejsze problemy, z którymi zarówno nasz kraj, jak i cały świat będzie musiał się zmierzyć w nadchodzących dziesięcioleciach [Nobre i in. 2019].

W przeszłości najbardziej powszechnym sposobem radzenia sobie z odpadami było ich składowanie. Ma to jednak wiele wad: stanowi zagrożenie dla środowiska, wymaga nadzoru nad takimi składowiskami oraz zajmuje duże powierzchnie [Chalermcharoenrat i in. 2015]. Obecnie jednak obserwuje się powolne odchodzenie od składowania odpadów z tworzyw sztucznych. Niestety w przypadku części odpadów koszt ekonomiczny i inwestycyjny recyklingu oraz odzysku często przekracza wartość odzyskanych materiałów i energii. W celu minimalizacji kosztów opracowuje się odpowiednie systemy zbiórki, transportu oraz selekcji odpadów [Malinowski, Chwiałkowski 2017].

Unia Europejska wprowadziła zunifikowany system gospodarki odpadami [Dyrektywa UE 2008], którego zadaniem jest zmniejszenie ilości odpadów, ponowne użycie, recykling, odzysk energii i unieszkodliwianie wstępnie przetworzonych odpadów innych niż niebezpieczne [Bessi i in. 2016]. Celem wprowadzenia tego systemu jest redukcja odpadów składowanych na wysypiskach z 45% w 2008 r. do 10% w 2035 r. [Pio i in. 2020]. W związku z tym przerób i wykorzystywanie odpadów jako paliwa alternatywnego wzbudza w ostatnich latach duże zainteresowanie. Dynamiczny rynek paliw kopalnych i postępujący wzrost ich cen także przyczyniają się do poszukiwania innych źródeł energii [García i in. 2021].

Poziom uzyskiwanego recyklingu materiałowego od lat zwiększa się i wynosi w granicach 21%. Jednak więcej niż $\frac{3}{4}$ odpadów pozostaje do zagospodarowania. Coraz więcej jest budowanych spalarni odpadów. Z punktu widzenia termicznej utylizacji tworzyw polimerowych najbardziej znaczącą ich cechą jest ich wysoka wartość opałowa. Najkorzystniejsze wartości osiągają polimery takie jak: PE (polietylen), PP (polipropylen), PS (polistyren). Ze względu na proporcjonalnie dużą zawartość masową chloru niższą wartością opałową wykazuje PVC (polichlorek winylu) [Kijeński i in. 2014].

Coraz większą uwagę skupia się na przetwarzaniu odpadów w energię. Produkcja paliwa z odpadów (RDF – Refuse derived fuel) i/lub stałego paliwa z odzysku (SRF – Solid recovered fuels) jest jedną z metod przetwarzania odpadów w energię, stosowanych w ciągu ostatnich kilku dekad w celu sprostanienia wyzwaniom związanym zarówno z odpadami, jak i energią [Rada, Chwiałkowski 2012]. RDF to wyselekcjonowana wysokokaloryczna frakcja przetworzonych stałych odpadów komunalnych [Gallardo i in. 2014; Nasrullah i in. 2015; Rada, Chwiałkowski 2014]. Jest otrzymywana z palnych części odpadów takich jak: śmieci, makulatura i odpady z tworzyw sztucznych. RDF jest przetwarzany zgodnie z wytycznymi i specyfikacjami prawnymi, głównie w celu uzyskania wysokiej kaloryczności. RDF może być stosowany w piecach cementowych, elektrowniach ciepłych, specjalnych kotłach. Cechy takie jak: wysoka kaloryczność, łatwe przechowywanie, łatwy załadunek i rozładunek oraz mniejsze wydzielanie zanieczyszczeń czynią go potencjalną alternatywą dla paliw kopalnych [Gendebien i in. 2003; Kobyashi i in. 2005].

Wykorzystanie RDF w procesach termicznych stało się popularne i cieszy się coraz większym zainteresowaniem na całym świecie, ponieważ jego produkcja może radykalnie zmniejszyć wymagania składowania i efektywnie wykorzystać energię odzyskaną z odpadów stałych [Gug i in. 2015; Patel i in. 2012; Zhou i in. 2013]. Wysoka zawartość energii w RDF sprawia, że jest on porównywalny z konwencjonalnymi paliwami kopalnymi [Garg i in. 2007].

Ważnymi parametrami w ocenianiu przydatności paliw alternatywnych są ciepło spalania oraz wartość opałowa. Ciepło spalania jest to ilość ciepła wydzielana przy całkowitym i zupełnym spalaniu paliwa, przy założeniu, że spaliny osiągają temperaturę początkową paliwa i trwały dla nich stan skupienia w danych warunkach termodynamicznych pomiaru (ciśnienie rzędu $3 \pm 0,2$ MPa i temperatura odniesienia stosowana w termochemii wynosząca 25°C). Woda pochodząca z wilgoci paliwa i procesu spalania (nasycona CO₂) znajduje się w postaci ciekłej i jest w stanie równowagi z jej parą, popiół występuje w stanie stałym [PN-ISO 1928:2020-05]. Wartość opałowa jest to ilość ciepłą

wydzielana przy spalaniu jednostki masy lub jednostki objętości paliwa przy jego całkowitym i zupełnym spalaniu, przy założeniu, że para wodna zawarta w spalinach nie ulega skropleniu, pomimo że spaliny osiągną temperaturę początkową paliwa [PN-ISO 1928:2020-05]. W tabeli 3.1 przedstawiono przykładowe wartości opałowych wybranych, najczęściej spotykanych tworzyw sztucznych.

Tabela 3.1. Wartości opałowe polimerów najczęściej spotykanych w strumieniach odpadów

Termoplast	Wartość opałowa MJ/kg
Polietylen	43-46
Polipropylen	42-46
Poli(chlorek winylu) twardy	19-21
Poli(chlorek winylu) na pokrycia podłogowe	14-16
Sztuczna skóra zawierająca poli(chlorek winylu)	24
Pianka z poli(chloreku winylu)	28
Poli(chlorek winylu) z antypirenem	21,8
Poliester chlorowany	17,5
Polistyren	39-42
Polistyren spieniony	41,4
Poliakrylonitryl	31,3
Poliwinylooctan	23
Poliamid	30,8
Poliwęglan	30,4
Poliuretan – elastomer	23,4
Poliuretan – elastyczna pianka	29,2
Politetrafluoroetylen	4,2
Żywica epoksydowa usieciowana aminą	32,1
Żywica epoksydowa usieciowana bezwodnikiem	29,1
Żywica poliestrowa	25-29
Pływa poliestrowa wzmocniona włóknami szklanymi	15-22

Źródło: [Janowska i in. 2007].

Ze względu na wysoką szkodliwość powstających w wyniku spalania związków chloroorganicznych należy zwrócić szczególną uwagę na badanie zawartości chloru w paliwie alternatywnym. Zgodnie z polskimi przepisami, spalanie odpadów musi odbywać się w temperaturze 850°C, a czas przebywania gazów spalinowych w instalacji musi wynosić co najmniej 2 s. W przypadku odpadów

zawierających więcej niż 1% chloru wymagana temperatura spalania wynosi 1100°C [Rozporządzenie Ministra Rozwoju... 2016]. Głównym źródłem tego pierwiastka jest niewyselekcjonowane ze strumieni odpadów tworzywo PCV.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizę badań próbek z pięciu strumieni odpadów pobranych w ciągu roku w celu określenia ich przydatności do odzysku energetycznego.

Materiały i metody

Duża heterogeniczność odpadów (**rysunek 3.1**) wymaga dokładnego ich rozdzielenia na konkretne frakcje materiałowe (strumienie). Celem przeprowadzonego badania było rozdzielanie materiałów i ustalenie czy otrzymane strumienie nadają się do wykorzystania w recyklingu energetycznym. Próbkę do badań zostały dostarczone przez NewCo Sp. z o.o., Centrum Odzysku i Zakład Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych. Przeprowadzone badania wraz z wyszczególnieniem użytej aparatury oraz zgodnie z metodyką zawartą w normach przedstawiono w **tabeli 3.2**.



Źródło: zdjęcia własne.

Rysunek 3.1. Odpady dostarczone do Centrum Odzysku i Zakładu Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych, NewCo Sp. z o.o.

Tabela 3.2. Przeprowadzone badania

Badania	Aparatura	Normy
Kaloryczność	kalorymetr KL-12Mn2	PN-ISO 1928:2020-05
Oznaczenie wilgotności	wagosuszarka serii MAC, MA 210.R	PN-G-04511:1980 PN-ISO 579:2002 PN-ISO 687:2005
Oznaczenie zawartości popiołu	piec muflowy SNOL	PN-ISO 1171:2002
Oznaczenie zawartości chloru	Titrateclass A prec. Brand pH-meter CP-401 Elmetron	PN-ISO 587:2000

Oznaczenie kaloryczności

Kaloryczność oznaczano przy użyciu kalorymetru KL-12Mn2. Przygotowaną wcześniej osuszoną z wilgoci przemijającą próbkę odważono w ilości 0,8-1,0 g. Poddawano ją prasowaniu w tabletkarce wraz z drutem zapłonowym. Następnie próbkę ważono i uzupełniano ewentualne ubytki masy, które powstały w czasie przygotowania tabletki. Tak przygotowaną próbkę umieszczano w tyglu kwarcowym. Końcówki drucika zapłonowego umieszczano w zaczech głowicy bomby kalorymetrycznej a nadmiar odcinano. Próbkę zamykano szczelnie w bombie kalorymetrycznej i podłączano do butli z tlenem. Przez 60 s przedmuchiowano bombę powietrzem pod ciśnieniem 5 bar. Następnie powoli zwiększano ciśnienie w celu wypełnienia bomby czystym tlenem i wypchnięciu pod ciśnieniem resztek powietrza atmosferycznego mogącego zawierać wpływającą na wynik wilgoć lub inne zanieczyszczenia. Następnie zakręcono zawór wylotowy gazu i zwiększano ciśnienie do 30 bar czystego tlenu. Tak przygotowaną bombę umieszczano w kalorymetrze w naczyniu kalorymetrycznym wypełnionym 2,7 dm³ wody o temperaturze mniejszej od temperatury otoczenia o 0,5-1°C. Podłączano elektrody i zamykano pokrywę wyposażoną w mieszadło mechaniczne oraz termometr cyfrowy. W tak przygotowanym kalorymetrze rozpoczynano badanie.

Oznaczenie wilgotności

Badanie przeprowadzono dwoma metodami. Wilgoć całkowitą rozdrobnionego paliwa oznaczono przy użyciu wagosuszarki serii MAC, MA 210.R. Wilgoć przemijającą oznaczano poprzez dwukrotne suszenie próbki 3 g w temperaturze 60°C przez 1 h, a następnie pozostawiano w temperaturze pokojowej na 2 h w celu unormowania poziomu wilgoci higroskopijnej wobec wilgoci powietrza.

Zawartość chloru

Do oznaczenia zawartości chloru przygotowano po dwie naważki 0,8 g próbki paliwa pozbawionej wilgoci przemijającej oraz próbkę ślepą – 4 g mieszaniny Eschki. W tyglu kwarcowym umieszczano trzy warstwy mieszaniny Eschki – na dnie warstwę 1 g czystej mieszaniny Eschki, następnie 0,8 g badanego paliwa wymieszanego z 2 g mieszaniny Eschki, całość pokrywano 1 g czystej mieszaniny Eschki.

Odpowiednio przygotowane próbki umieszczano w piecu muflowym w temperaturze 675°C na 2 h. Po wypalaniu tygłe wyciągano z pieca na żaroodporną płytkę i zostawiano na ok. 15 min. do ostygnięcia.

Zawartość pojedynczego tygla wsypywano do zlewki (100 ml). Następnie pusty tygiel przepłukiwano ok. 75 ml gorącej wody destylowanej. Jeżeli widoczne były cząstki stałe próbki, rozdrabniano je przy użyciu szklanej bagietki. Następnie zlewkę z zawiesiną umieszczano na płycie grzejnej i doprowadzano do wrzenia w całej objętości. Mieszano zawartość zlewki w czasie grzania, by zapobiec powstawaniu osadów tworzących tzw. kożuch. Zagotowaną zawartość zlewki przesączano na gorąco. Zawartość sączka przemywano gorącą wodą 5 razy po 5 ml. W przypadku gdy ilość przesączu w zlewce nie wynosiła 100 ml, uzupełniano ją wodą destylowaną.

Po wystudzeniu przesączu w ciągu 1 h do temperatury pokojowej przeprowadzano miareczkowanie z wykorzystaniem azotanu (V) srebra AgNO_3 . Przesącz w zlewce neutralizowano (ma wysokie pH ok. 11-12) stężonym kwasem azotowym (V). Po dodaniu pierwszej porcji kwasu azotowego (V) sprawdzano odczyn przy użyciu pH-metru. Jeśli było to konieczne, dodawano kolejną porcję kwasu azotowego (V) do całkowitego zneutralizowania. Następnie dodawano wskaźnik (chromian (VI) potasu K_2CrO_4) w ilości 10 kropli. Zlewkę ustawiano na mieszadle magnetycznym. Przy wykorzystaniu automatycznej biurety miareczkowano zawartość zlewki roztworem AgNO_3 (0,050 mol/dm³). Punkt końcowy miareczkowania następował w momencie, gdy zabarwienie roztworu zmieniało się z barwy żółtej (klarownej) w pomarańczową/brunatną (mętną).

Zawartość popiołu

Przygotowywano próbki odpadów o wadze 3 g i umieszczano w tyglu kwarcowym, a następnie umieszczono w piecu muflowym na 30 min. w celu wypalania w temperaturze 500°C. Po tym czasie zwiększano temperaturę do 815°C w ciągu 30 min. i pozostawiano na 1 h. Następnie próbki studzono i ważono.



Źródło: zdjęcia własne.

Rysunek 3.2. Paliwo RDF po rozdrobieniu odpadów do wielkości mniejszej niż 30 mm

W ciągu roku wykonano po 12 analiz próbek z pięciu strumieni w celu określenia przydatności ich do odzysku energetycznego. Próbkę pobrane zostały z siedmiu punktów badanego transportu po wstępnym rozdrobieniu do wielkości mniejszej niż 30 mm (**rysunek 3.2 i 3.3**).



Źródło: zdjęcie własne.

Rysunek 3.3. Paliwo RDF po rozdrobieniu mniejszym niż 30 mm składowane pod dachem w odpowiednich suszarniach w Centrum Odzysku i Zakład Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych, NewCo Sp. z o.o.

Próbki mielono dwukrotnie do rozmiaru mniejszego niż 1 mm (**rysunek 3.4**) i poddawano mieszaniu w celu homogenizacji badanej frakcji. Przeprowadzono badania takich parametrów próbki jak: wartość opałowa, zawartość popiołu, wilgotność oraz stężenie chloru.



Źródło: zdjęcia własne.

Rysunek 3.4. Przykładowa próbka strumienia 1. rozdrobniona do rozmiaru mniejszego niż 1 mm i poddana homogenizacji przed badaniem

Wyniki

Strumień 1. został przebadany 12 razy (**tabela 3.3**). W zdecydowanej większości wykazywał wysoką wartość opałową (~25 MJ/kg), co wskazywało na wysoką zawartość polimerów wysokoenergetycznych w jego składzie. Zawartość chloru w części próbek była podwyższona, pięciokrotnie przekraczała granicę 1% masy badanej próbki. Może to wskazywać na znaczny udział w strumieniu PCV. Zawartość wilgoci w próbkach wynosiła od 7,5 do 20,6%, (wartość uśredniona – 15,1%). Masa oznaczonego popiołu pozostałego ze spalania próbek kształtowała się od 3,17 do 8,45% masy badanego paliwa.

Tabela 3.3. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 1.

Badanie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Średnia
Chlor [%]	0,59	0,63	1,76	0,46	1,31	0,62	1,65	0,31	0,56	0,97	1,25	1,01	0,92
Wilgoć [%]	13,3	14,7	7,5	8,6	20,6	15,2	20,1	17,1	8,1	10,5	26,7	18,3	15,1
Kaloryczność [MJ/kg]	19,2	19,8	25,8	23,9	24,7	26,6	26,2	26,5	35,4	25,3	23,7	25,8	25,2
Popiół [%]	6,68	3,17	3,37	3,43	4,16	3,19	6,69	3,99	3,90	4,38	6,75	8,45	4,84

Strumień 2. został przebadany 12 razy (**tabela 3.4**). Tylko część próbek wykazywała wysoką wartość opałową (~22 MJ/kg). Zawartość chloru w trzech próbkach wynosiła powyżej 1%, co wskazuje na prawdopodobny duży udział frakcji PCV, jako jednego ze składników strumienia. Przekroczenia te były jednak sporadyczne i średnio w strumieniu udział chloru wynosił poniżej 1%. Zawartość wilgoci w próbkach wynosiła od 7,9 do 33,4% (wartość średnia – 14,3%). Masa oznaczonego popiołu pozostałego ze spalania próbek była stosunkowo wysoka i wynosiła od 6,38 do 11,1% masy badanego paliwa.

Tabela 3.4. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 2.

Badanie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Średnia
Chlor [%]	1,09	0,44	0,27	0,48	0,73	0,86	1,63	1,38	0,91	0,51	0,41	0,88	0,80
Wilgoć [%]	15,2	8,2	7,9	13,9	9,0	8,2	11,2	14,3	12,0	23,4	33,4	15,0	14,3
Kaloryczność [MJ/kg]	24,8	24,4	27,1	21,2	24,3	23,6	23,4	23,0	22,3	17,0	15,7	16,2	21,9
Popiół [%]	7,40	7,25	11,10	9,55	8,04	7,27	8,26	7,69	10,60	9,25	8,62	6,38	8,45

Strumień 3. został przebadany 12 razy (**tabela 3.5**). Większość próbek nie wykazywała wysokiej wartości opałowej (poniżej 22,5 MJ/kg), a średnia wynosiła poniżej 19 MJ/kg, co wskazuje na niską zawartość polimerów w składzie i niższą przydatności tego strumienia do przetworzenia. Zawartość chloru tylko w jednym badaniu była podwyższona. Średni udział chloru w strumieniu wynosił poniżej 0,7%. Zawartość wilgoci w próbkach wynosiła od 10,1 do 40,3% (średnio 22,8%). Masa oznaczonego popiołu pozostałego ze spalania próbek kształtowała się od 4,58 do 20,88%.

Tabela 3.5. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 3.

Badanie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Średnia
Chlor [%]	0,75	0,32	0,74	0,72	0,62	0,39	0,70	0,24	0,63	1,69	0,71	0,95	0,70
Wilgoć [%]	15,6	17,6	17,3	26,7	16,8	24,8	13,8	36,9	32,7	21,3	40,3	10,1	22,8
Kaloryczność [MJ/kg]	23,2	19,3	20,4	16,6	21,9	16,8	23,1	11,4	18,9	18,0	13,1	23,0	18,8
Popiół [%]	6,77	6,82	8,25	13,93	4,58	20,88	11,91	20,15	7,75	9,75	8,48	7,41	10,55

Strumień 4. został przebadany 12 razy (**tabela 3.6**). Tylko trzy próbki wykazywały wysoką wartość opałową (powyżej 25 MJ/kg), a średnia ich wartość wynosiła powyżej 23 MJ/kg. Wysoka zawartość chloru wystąpiła tylko w jednym badaniu (powyżej 3%), a średnia dla strumienia wynosiła poniżej 1%. Zawartość wilgoci w próbkach oznaczono w granicach od 8,3 do 22,0%, średnia wynosiła 14,5%. Masa oznaczonego popiołu pozostałego ze spalania próbek wynosiła od 6,95 do 10,56%.

Tabela 3.6. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 4.

Badanie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Średnia
Chlor [%]	0,79	0,94	0,77	0,86	0,97	0,79	0,46	3,14	0,59	0,28	0,73	0,74	0,92
Wilgoć [%]	10,1	16,9	12,0	16,6	17,9	11,9	22,0	11,2	11,1	8,3	10,8	24,9	14,5
Kaloryczność [MJ/kg]	21,7	23,5	23,3	21,8	21,9	27,5	17,8	21,5	25,4	27,8	24,8	16,2	22,8
Popiół [%]	6,95	8,58	8,58	9,58	9,87	10,28	10,56	9,82	10,41	10,42	9,30	9,10	9,45

Strumień 5. został przebadany 12 razy (**tabela 3.7**). Tylko część próbek wykazywała wysoką wartość opałową (~25 MJ/kg), a średnia wartość wynosiła powyżej 23 MJ/kg, co wskazuje na wysoką zawartość polimerów termoplastycznych w jego składzie po wstępnej selekcji. Stężenie chloru w połowie próbek wykazywało podwyższony poziom 2-4%, co wskazują na bardzo duży udział PCV jako jednego ze składników strumienia. Zawartość wilgoci w próbkach wynosiła od 6,1 do 25,4%, (średnia – 13,5%). Masa oznaczonego popiołu pozostałego ze spalania próbek wynosiła 6,0 do 18,62%.

Tabela 3.7. Wyniki analizy zawartości chloru, wilgoci, popiołu i kaloryczności strumienia 5.

Badanie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Średnia
Chlor [%]	1,50	3,87	5,18	7,70	3,53	2,33	0,63	0,77	0,47	0,44	0,98	0,04	2,28
Wilgoć [%]	12,8	20,0	14,1	9,9	25,4	25,0	4,9	11,6	11,0	6,1	13,0	8,3	13,5
Kaloryczność [MJ/kg]	20,0	20,6	25,9	24,6	18,2	18,5	27,7	23,8	23,5	28,8	17,8	19,3	22,4
Popiół [%]	9,74	10,42	7,24	8,05	11,21	8,73	6,24	13,09	18,62	6,00	5,09	8,10	9,38

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzono badania próbek ze strumieni odpadów składających się ze zmieszanych tworzyw sztucznych dostarczonych przez NewCo Sp. z o.o., Centrum Odzysku i Zakład Przetwarzania Odpadów i Produkcji Paliw Alternatywnych.

Analizy próbek wykazały przydatność heterogenicznych strumieni odpadów do odzysku w ramach recyklingu energetycznego ze względu na wysoką wartość opałową.

Dla efektywniejszego ich wykorzystania należałoby przeprowadzić proces selekcji i segregacji w celu ujednoczenia składu, ze względu na duży rozrzut parametrów badanych próbek nawet w jednym strumieniu. Szczególną uwagę należy zwrócić na oczyszczenie strumieni odpadów z polichlorku winylu (PCV), który bezpośrednio wpływa na zawartość chloru w paliwie i możliwości jego recyklingu energetycznego.

Analiza wilgoci badanych próbek wykazała dość duży rozrzut wyników. Aby móc wykorzystać odpady jako skuteczne paliwo, byłoby wymagane przeprowadzenie odpowiednich procesów suszenia aby pozbyć się nadmiaru wody.

Wysoka makroheterogeniczność badanych strumieni wymaga przeprowadzenia procesu rozdrobnienia i ujednoczenia w celu homogenizacji składu przetwarzanych odpadów przed następnymi procesami.

Literatura:

Balat M. 2008. Mechanism of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 2. Reactions of Gasification, Taylor & Francis Group, 636-648.

Bessi C., Lombardi L., Meoni r., Canovai A., Corti A. 2016. Solid recovered fuel: an experiment on classification and potential applications. Waste Management, 47, 184-194.

Białowiec A., Micuda M., Koziel J. 2018. Waste to carbon: densification of torrefied refuse-derived fuel. Energies, 11, 3233.

Chalermcharoenrat S., Laohalidanond K., Kerdsuwan S. 2015. Optimization of combustion behavior and producer gas quality from reclaimed landfill through highly densify RDF-gasification. Energy Procedia, 79, 321-326.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>.

Gallardo A., Carlos M., Bovea M.D., Colomer F.J., Albarrán F. 2014. Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. Journal of Cleaner Production 83, 118-125.

García r., González-Vázquez M.P., Rubiera F., Pevida C., Gil M.V. 2021. Co-pelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. Journal of Cleaner Production, Vol 328, 129635.

- Garg A., Smith r., Hill D., Simms N., Pollard S. 2007. Wastes as co-fuels: the policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications. *Environmental Science & Technology* 41 (14), 4868-4874.
- Gendebien A., Leavens A., Blackmore K., Godley A., Lewin K., Whiting K.J., Davis r. 2003. Refuse derived fuel, current practice and perspectives. Final report of European Commission-Directorate General Environment, 1-8.
- Gug J., Cacciola D., Sobkowicz M.J. 2015. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35, 283-292.
- Janowska G., Przygocki W., Włochowicz A. 2007 *Palność polimerów i materiałów polimerowych*, WNT.
- Kijeński J., Błędzki A.K., Jeziórska r. 2011 *Odzysk i recykling materiałów polimerowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 78-82.
- Kobyashi N., Itaya Y., Piao G., Mori S., Kondo M., Hamai M., Yamaguchi M. 2005. The behavior of flue gas from RDF combustion in a fluidized bed. *Powder Technology*, 151: 87-95.
- Malinowski A., Chwiałkowski W. 2017. Characterization of refuse derived fuels from selected municipal solid waste management plants with an example of their valorization into gas fuel and chemicals. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, 19.
- Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., Hurme M., Kärki J. 2015. Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3: solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Management & Research*, 33 (2), 146-156.
- Nobre C., Vilarinho C., Alves O., Mendes B., Gonçalves M. 2019. Upgrading of refuse derived fuel through torrefaction and carbonization: evaluation of RDF char fuel properties. *Energy*, 181, 66-76.
- Patel C., Lettieri P., Germanà A. 2012. Techno-economic performance analysis and environmental impact assessment of small to medium scale SRF combustion plants for energy production in the UK. *Process Safety and Environmental Protection* 90 (3), 255-262.
- Pio D.T., Tarelho L.A.C., Tavares A.M.A., Matos M.A.A., Silva V. 2020. Cogasification of refused derived fuel and biomass in a pilot-scale bubbling fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management* 206, 112476.
- PN-G-04511:1980. Paliwa stałe – Oznaczanie zawartości wilgoci.
- PN-ISO 1171:2002. Paliwa stałe – Oznaczanie popiołu.
- PN-ISO 1928:2020-05. Paliwa stałe – Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
- PN-ISO 579:2002. Koks z węgla kamiennego – Oznaczanie zawartości wilgoci całkowitej.
- PN-ISO 587:2000. Paliwa stałe – Oznaczanie zawartości chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki.
- PN-ISO 687:2005. Paliwa stałe – Koks – Oznaczanie wilgoci w próbce do badań do analizy ogólnej.
- Rada E.C., Andreottola G. 2012. RDF/SRF: which perspective for its future in the EU. *Waste Management*, 32 (6), 1059-1060.
- Rada E.C., Ragazzi M. 2014. Selective collection as a pretreatment for indirect solid recovered fuel generation. *Waste Management*, 34 (2), 291-297.
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu Dz.U. 2016 poz. 108).
- Zhou C., Zhang Q., Arnold L., Yang W., Blasiak W. 2013. A study of the pyrolysis behaviors of pelletized recovered municipal solid waste fuels. *Applied Energy*, 107, 173-182.

Rozdział 4

Geotermia jako element gospodarki niskoemisyjnej gmin

mgr Ewa Filippovits

mgr inż. Dorota Lasek-Woroszkiewicz

dr Mariusz Socha

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

■ Wstęp

Narastające problemy ekologiczne oraz konieczność podjęcia działań związanych z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, a także założenia polityki energetycznej państwa, która przewiduje m.in. co najmniej 23-procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2030 r. [Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska... 2021; Krajowy plan... 2019] skłaniają prywatnych przedsiębiorców i lokalne samorządy do inwestowania w odnawialne źródła energii, dążąc do uzyskania neutralności klimatycznej, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa energetycznego.

Jednym z najczystszych i praktycznie niewyczerpalnych źródeł energii jest energia cieplna Ziemi, zwana energią geotermalną, która pochodzi z różnego rodzaju przemian chemicznych i procesów geologicznych mających miejsce w poszczególnych warstwach planety. Źródłem największej ilości energii są procesy magmowe zachodzące w jądrze Ziemi, przemiany fazowe składników mineralnych w płaszczu Ziemi oraz procesy geochemiczne i promieniotwórcze przebiegające w obrębie litosfery. Przepływ wypromieniowywanego przez Ziemię ciepła to proces samorzutny i nieodwracalny. Ciepło przemieszcza się w kompleksach skalnych poprzez konwekcję i kondukcję, przenika ku powierzchni i ogrzewa skały oraz media znajdujące się w przestrzeniach porowych, w tym wodę [Chmura, Chudek 2000]. Całkowitą ilość ciepła zgromadzoną w skorupie ziemskiej do określonej głębokości na przyjętym obszarze bilansowym, w odniesieniu do średniej rocznej temperatury odnotowanej

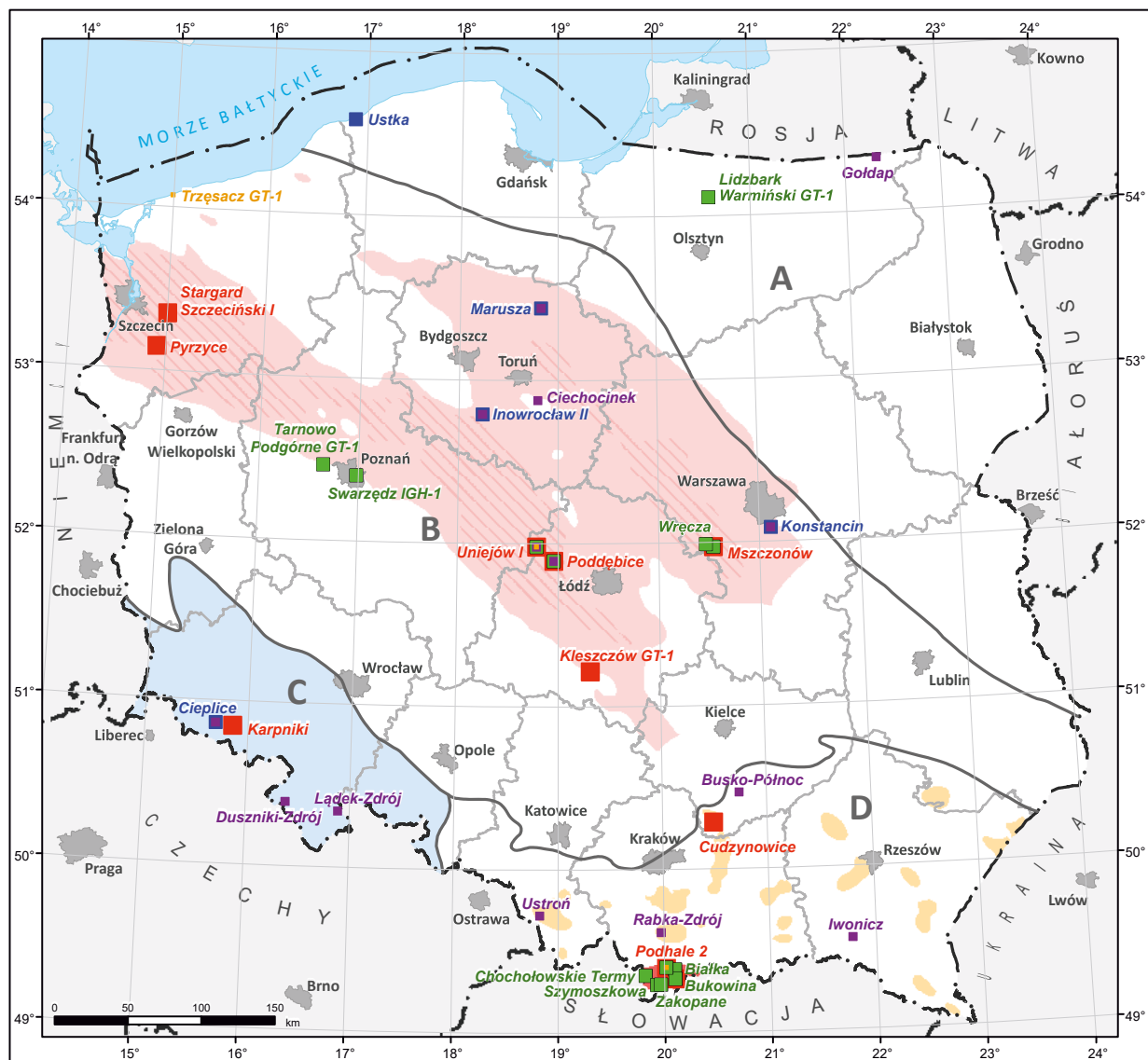
na powierzchni Ziemi, określa się mianem zasobów geotermalnych [Muffler, Cataldi 1978]. Wśród zasobów geotermalnych wyróżnia się zasoby hydrotermalne, w przypadku gdy nośnikiem ciepła jest woda termalna oraz zasoby petrotermalne, gdy energia geotermalna zakumulowana jest w suchych gorących skałach (HDR) [Noga i in. 2013]. Zgodnie z ustawą z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze [Dz.U. 2022 poz. 1072 t.j.] wody termalne, określane także mianem wód geotermalnych, są to wody podziemne, które na wypływie z ujęcia osiągają temperaturę nie niższą niż 20°C, z wyjątkiem wód pochodzących z odwadniania wyrobisk górniczych. Niezależnie od nośnika energii geotermalnej, na możliwość jej pozyskania wpływają trzy głównie czynniki: przyrodnicze, technologiczne i ekonomiczne [Szewczyk 2010]. Podjęcie decyzji o inwestycji geotermalnej wymaga przede wszystkim możliwie szczegółowego rozpoznania naturalnych warunków występowania energii geotermalnej na danym obszarze, bowiem czynnik ten, w odróżnieniu od uwarunkowań technologicznych i ekonomicznych, jest niezmienny w czasie.

Eksploatacja wód termalnych na ogół odbywa się w układzie zamkniętym, przy wykorzystaniu dubletów geotermalnych. W tym celu wykonuje się dwa głębokie otwory – produkcyjny (wydobywczy) i chłonny (zatlaczający schłodzoną wodę z powrotem do górotworu), dzięki którym możliwe jest zachowanie odnawialności złoża wód termalnych i zabezpieczenie jego zasobów. Taki układ zapewnia długoletnią pracę przy zachowaniu stabilnych parametrów eksploatacyjnych. Jednotworowa eksploatacja możliwa jest w przypadku wód termalnych słabo zmineralizowanych, które po oddaniu części zawartego w nich ciepła są kierowane do cieków powierzchniowych, kanalizacji miejskiej lub innych powierzchniowych odbiorników [Górecki (red.) 2006].

W niniejszej pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat potencjału geotermalnego w Polsce. Scharakteryzowano stan udokumentowania zasobów wód termalnych w Polsce oraz stopień i sposób ich wykorzystania. Ponadto omówiono tematykę ryzyka dotyczącego ujmowania i zagospodarowania wód termalnych, a także społeczne i ekonomiczne bariery związane z rozwojem geotermii w Polsce. Opisano również działania podejmowane w celu wsparcia rozwoju geotermii jako odnawialnego źródła energii.

■ Perspektywy ujmowania wód termalnych

W świetle aktualnego rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego w znacznej części kraju istnieją perspektywy dla ujmowania i zagospodarowania wód termalnych. Najbardziej perspektywicznymi obszarami są: niecka podhalańska oraz synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskie i synklinorium brzeżne w obrębie Niżu Polskiego (**rysunek 4.1**). Na obszarze Niżu Polskiego najkorzystniejsze parametry zbiornikowe występują w utworach mezozoicznych, w obrębie których głównymi zbiornikami wód termalnych są dolnojurajski i dolnokredowy. Zbiornik kredy dolnej w przybliżeniu obejmuje nieckę szczecińską oraz fragmenty niecek mogileńskiej, łódzkiej i warszawskiej. Zbiornik jury dolnej zawiera się w obrębie niecki szczecińskiej, łódzkiej, warszawskiej oraz południowej części niecki pomorskiej i centralnej części antyklinorium środkowopolskiego [Górecki (red.) 2006; Socha (red.) 2020b]. Podhalański system geotermalny związany jest przede wszystkim z formacjami paleogeńsko-mezozoicznymi



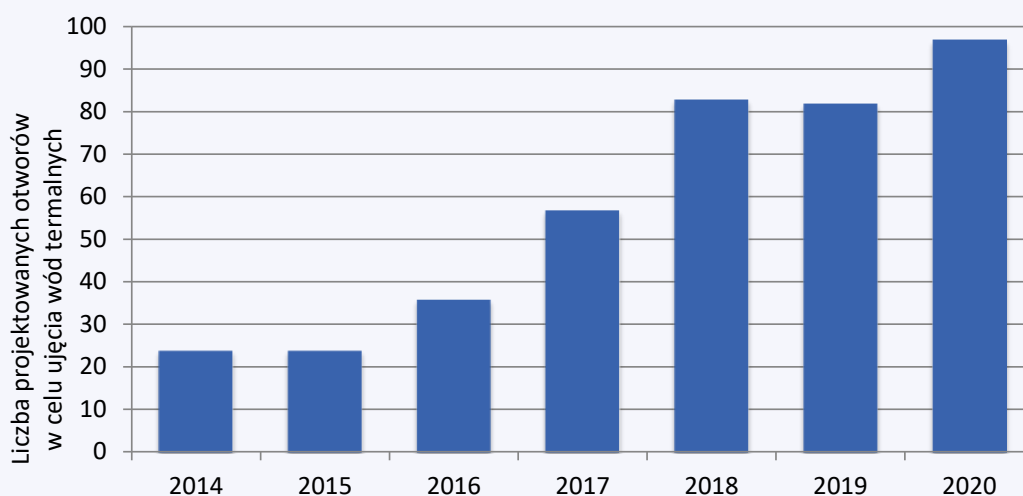
- komunalne i lokalne ciepłownie geotermalne
 - ośrodki rekreacyjne wykorzystujące wody termalne
 - ośrodki rekreacyjne wykorzystujące lecznicze wody termalne
 - uzdrowiska i ośrodki lecznicze wykorzystujące wody termalne i lecznicze termalne
 - inne zagospodarowanie wód termalnych
- granice prowincji (wg Dowgiałły i Paczyńskiego, 2002):
- A – platformy prekambryjskiej
 - B – platformy paleozoicznej
 - C – sudeckiej
 - D – karpackiej
- Obszary perspektywiczne dla ujmowania wód termalnych:
- Niż Polski – zbiornik jury dolnej (wg Góreckiego, red., 2006)
 - Niż Polski – zbiornik kredy dolnej (wg Góreckiego, red., 2006)
 - Karpaty zewnętrzne – zbiorniki paleogeńsko-mezozoiczne i zapadlisko przedkarpackie – zbiorniki neogeńskie, mezozoiczne i paleozoiczne (wg Góreckiego, red., 2011, 2012, 2013)
 - niecka podhalańska – zbiornik paleogeńsko-mezozoiczny (wg Paczyńskiego, Płochniewskiego, 1996)
 - Sudety i blok przedsudecki (wg Dowgiałły, Paczyńskiego, 2002)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Dowgiałły, Paczyński 2002; Górecki (red.) 2006, 2011, 2012, 2013; Paczyński, Płochniewski 1996].

Rysunek 4.1. Wykorzystanie wód termalnych w Polsce na tle obszarów perspektywicznych dla ujmowania wód termalnych według stanu na 31.12.2020 r.

[Górecki (red.) 2011]. W Sudetach i na obszarze bloku przedsudeckiego strefami szczególnie perspektywicznymi dla występowania wód termalnych są spękania i głębokie rozłamy tektoniczne w skałach krystalicznych tworzące uprzywilejowane drogi migracji wód w głąb górotworu i umożliwiające ich podziemny przepływ. Z uwagi na niski stopień rozpoznania Sudety i blok przedsudecki w całości uznaje się za perspektywiczne dla ujmowania wód termalnych (**rysunek 4.1**) [Dowgiało, Fistek 2008; Socha (red.) 2020b]. W pozostałych rejonach Polski efektywne zagospodarowanie zasobów geotermalnych do celów ciepłowniczych może być ograniczone niskimi wydajnościami otworów wiertniczych [Kępińska (red.) 2017]. W zapadlisku przedkarpackim występowanie wód termalnych związane jest z kilkoma zbiornikami w zależności od rejonu. Najkorzystniejszych parametrów należy spodziewać się w rejonie Bochni i Brzeska w obrębie piaskowców cenomanu. W zachodniej części zapadliska zbiorniki perspektywiczne zbudowane są z utworów węglanowych dewonu i karbonu, natomiast na wschodzie są to piaskowce jury środkowej. W strefie brzeźnej nasunięcia karpackiego, zlokalizowanej na południe od Bochni, Brzeska i Tarnowa, korzystne parametry występują w obrębie utworów jury górnej [Kępińska (red.) 2017; Socha (red.) 2020b]. W Karpatach zewnętrznych występowanie wód termalnych związane jest z niewielkimi, zamkniętymi strukturami [Chowaniec 2006]. Lokalnie korzystne warunki dla ujmowania wód termalnych występują w strefach nasunięć tektonicznych [Kępińska (red.) 2017; Socha (red.) 2020b].

Podejmowanie działalności związanej z poszukiwaniem, ujmowaniem i zagospodarowaniem wód termalnych możliwe jest na podstawie projektów robót geologicznych zatwierdzonych przez właściwych miejscowo marszałków województw. Ilość zatwierdzonych projektów robót geologicznych na wykonanie otworu wiertniczego w celu ujęcia wód termalnych jest odzwierciedleniem zainteresowania tego typu inwestycjami. Utrzymująca się od lat tendencja wzrostowa (**rysunek 4.2**) pozwala oczekiwać wzrostu udziału geotermii w pozyskaniu energii cieplnej ze źródeł odnawialnych. Zgodnie ze stanem na 31.12.2020 r. w mocy pozostawały 94 projekty robót geologicznych, w ramach których zaplanowano wykonanie 97 otworów wiertniczych ujmujących wody termalne [Felter i in. 2021b].



Źródło: opracowanie własne na podstawie [Felter i in. 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021a, b].

Rysunek 4.2. Ilość projektowanych otworów w celu ujęcia wód termalnych w ramach zatwierdzonych projektów robót geologicznych, pozostających w mocy w latach 2014-2020

Rozmieszczenie projektowanych prac związanych z ujmowaniem wód termalnych na obszarze Polski jest nierównomierne. Dotychczas najwięcej tego typu przedsięwzięć zostało zaplanowanych w województwie łódzkim (22 otwory), mazowieckim (13 otworów) i dolnośląskim (12 otworów) (**tabela 4.1**). Ich lokalizacja w znacznym stopniu pokrywa się z zasięgiem wyznaczonych obszarów perspektywicznych.

Tabela 4.1. Liczba projektowanych otworów w celu ujęcia wód termalnych w poszczególnych województwach według stanu na 31.12.2020 r.

Województwo	Liczba projektowanych otworów
dolnośląskie	12
kujawsko-pomorskie	6
lubelskie	4
lubuskie	0
łódzkie	22
małopolskie	8
mazowieckie	13
opolskie	1
podkarpackie	6
podlaskie	1
pomorskie	0
śląskie	4
świętokrzyskie	6
warmińsko-mazurskie	0
wielkopolskie	9
zachodniopomorskie	5
SUMA	97

Bariery rozwoju geotermii

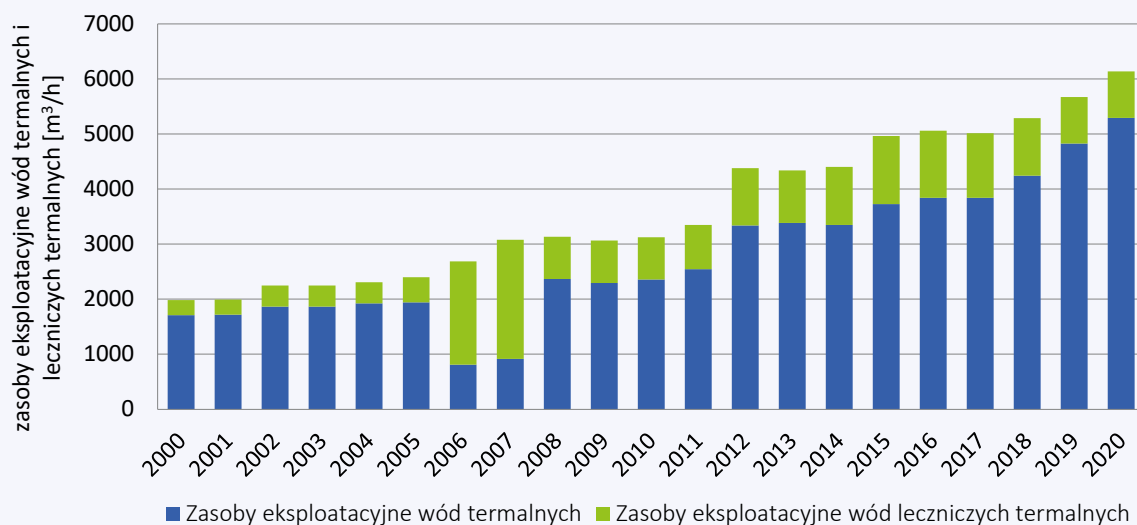
Ważnym elementem analizy rozwoju energetyki wykorzystującej potencjał wód termalnych są czynniki społeczne [Socha 2008; Zabłocki 2013; Socha (red) 2020a], które wyrażają stopień akceptacji i poparcia nowych inwestycji zmierzających do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii, w tym energii geotermalnej, przez samorzady gminne w przyjmowanych strategiach rozwoju i wieloletnich prognozach finansowych. Należy podkreślić, że dostęp do energii geotermalnej, która stanowi stabilne i czyste źródło energii, może zagwarantować jednostkom samorządu terytorialnego nie tylko bezpieczeństwo energetyczne, ale także rozwój gospodarczy oraz wzrost komfortu życia

lokalnej społeczności. Wykorzystanie potencjału geotermalnego może także znacząco zasilać budżet samorządów gminnych, przedsiębiorców i mieszkańców, w związku z rozwojem sektorów takich jak turystyka, handel czy usługi [Filippovits, Socha 2021].

Według danych zgromadzonych w ostatnim czasie przez PIG-PIB (Socha (red.) 2020a) samorządy gminne wykazują na ogół pozytywny stosunek do ewentualnego zagospodarowania energii geotermalnej na swoim obszarze, jednak napotykać szereg ograniczeń utrudniających podjęcie tego typu inwestycji. Wśród nich najczęściej wskazywane są bariery finansowe. Mimo rządowych programów wsparcia finansowego (dotacje, pożyczki) wdrażanych przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, które znacząco ograniczają ryzyko geologiczne związane z inwestycjami geotermalnymi, wiele samorządów w dalszym ciągu boryka się z brakiem odpowiednich środków na realizację tego typu przedsięwzięć i napotyka na wiele problemów związanych z pozyskiwaniem środków finansowych od państwa lub prywatnych inwestorów. Problemem pozostaje także wciąż niewystarczająca wiedza na temat rzeczywistego potencjału geotermalnego Polski. W różnego rodzaju strategicznych dokumentach gmin znajdują się zapisy na temat konieczności wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii, ale bardzo często są one niepełne, zbyt ogólne lub nieaktualne. Wiedza na temat geotermii powinna być oparta na rzetelnych i wiarygodnych źródłach informacji oraz na współpracy i konsultacjach z placówkami naukowymi, które w swojej pracy badawczej podejmują tę tematykę i dążą do wskazania kierunków optymalizacji wykorzystania dostępnych zasobów geotermalnych w Polsce [Filippovits, Socha 2021]. Innym, nie mniej ważnym, problemem w procesie zagospodarowania wód termalnych są niedostosowane do niego przepisy prawne. Na kwestię braku odpowiednich uregulowań wskazywano na przestrzeni lat niejednokrotnie [Kołakowki 2015; Kępińska 2016, 2018; Filippovits, Socha 2021]. Choć ustawodawstwo związane generalnie z odnawialnymi źródłami energii podlega ciągłym dostosowywaniom do zmieniającej się rzeczywistości, to wykorzystanie energii geotermalnej nadal pozostaje tylko w niewielkim stopniu uregulowane prawnie.

■ Stan udokumentowania zasobów wód termalnych

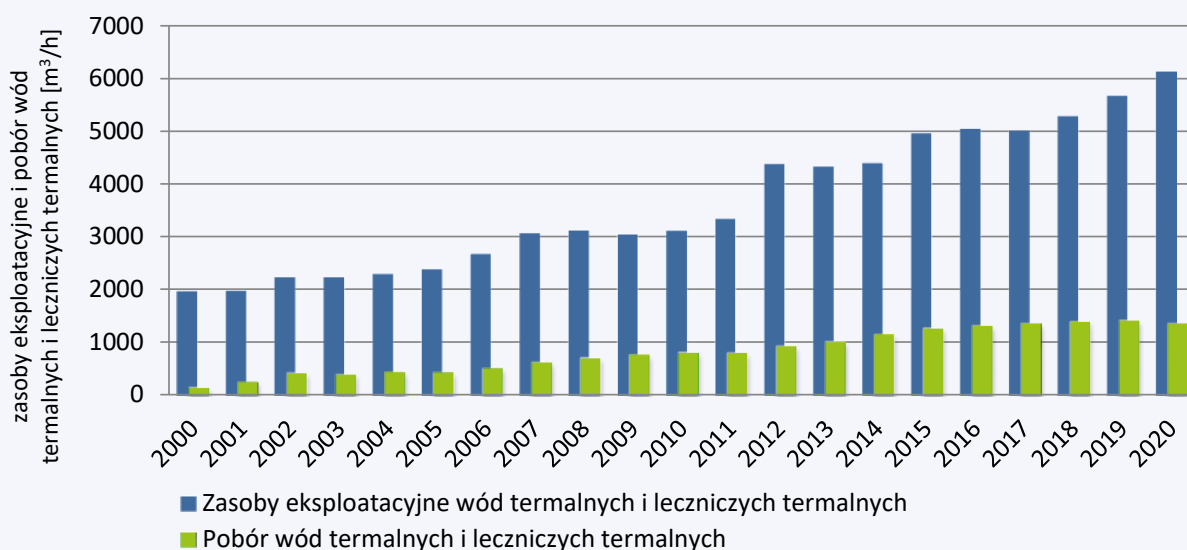
W wyniku prowadzonej od lat działalności związanej z ujmowaniem wód termalnych do końca 2020 r. udokumentowano 35 złóż wód termalnych, a w kolejnych 28 stwierdzono występowanie wód termalnych o właściwościach leczniczych, zgodnie z ustawą Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2022 poz. 1072 t.j.). Łączne zasoby eksploatacyjne ujęć wód termalnych i leczniczych termalnych, definiowane zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. 2016 poz. 2033) jako ilość wód podziemnych możliwą do pobrania z ujęcia w danych warunkach hydrogeologicznych i techniczno-ekonomicznych, z uwzględnieniem zapotrzebowania na wodę i przy zachowaniu wymogów ochrony środowiska, wynosiły 6 135,19 m³/h [Sokołowski, Skrzypczyk 2021]. W stosunku do 2000 r. nastąpił ich ponad trzykrotny przyrost (**rysunek 4.3**).



Źródło: opracowanie własne na podstawie [Skrzypczyk 2001-2006; Skrzypczyk, Sokołowski 2007-2017, 2019; Sokołowski, Skrzypczyk 2018, 2020, 2021].

Rysunek 4.3. Zmiany zasobów eksploatacyjnych ujęć wód leczniczych i termalnych w latach 2000-2020

Mimo wyraźnej i stałej intensyfikacji prac projektowanych w celu ujmowania wód termalnych oraz wzrostu udokumentowanych zasobów, ich pobór do celów gospodarczych od lat nieznacznie przekracza 20% wszystkich zatwierdzonych zasobów eksploatacyjnych tego typu wód (**rysunek 4.4**). W 2020 r. wyeksploatowano 11 745 081,19 m³ wód termalnych i leczniczych termalnych (1 359,38 m³/h). W odniesieniu do 2000 r. nastąpił znaczny, niemal 9-krotny przyrost poboru, który wyniósł 10 381 014,89 m³/rok (1 201,51 m³/h) [Skrzypczyk 2001; Sokołowski, Skrzypczyk 2021].



Źródło: opracowanie własne na podstawie [Skrzypczyk 2001-2006; Skrzypczyk, Sokołowski 2007-2017, 2019; Sokołowski, Skrzypczyk 2018, 2020, 2021].

Rysunek 4.4. Zasoby eksploatacyjne i pobór wód termalnych i leczniczych termalnych w latach 2000-2020

Charakterystyka ryzyka związanego z ujmowaniem i zagospodarowaniem wód termalnych

W Polsce od wielu lat toczy się gorąca dyskusja na temat wykorzystania energii wód termalnych. Pojawiają się zarówno głosy entuzjastów twierdzących, że energia wód termalnych może całkowicie zastąpić konwencjonalne nośniki energii, jak i głosy sceptyków uważających, że inwestycje w ten sektor nie są uzasadnione ekonomicznie ani społecznie. Tylko racjonalne podejście do wykorzystania tych zasobów, oparte na rzetelnych przesłankach naukowych i ekonomicznych, może przyczynić się do wzrostu wykorzystania zasobów złóż wód termalnych w Polsce. Opłacalne ekonomicznie zagospodarowanie potencjału wód termalnych powinno opierać się na szczegółowej analizie warunków hydrogeologicznych i złożowych ich występowania. Konieczne jest jednak również określenie ryzyka związanego z ujmowaniem wód termalnych oraz szczegółowa charakterystyka rynku odbiorców. Ryzyko inwestycyjne powinno być oceniane przede wszystkim przez pryzmat czynników takich jak: wydajność ujęcia, temperatura wód, głębokość zalegania warstwy wodonośnej, mineralizacja i skład chemiczny wód. Przy ocenie ryzyka inwestycyjnego niezwykle ważne jest również wzięcie pod uwagę możliwości wykorzystania pełnej mocy cieplnej ujęcia, możliwego stopnia schłodzenia wód, koncentracji zapotrzebowania na ciepło i odległości ujęcia od potencjalnych odbiorców. Inwestycje mające na celu zagospodarowanie potencjału wód termalnych powinny posiadać uzasadnienie ekonomiczne polegające na tym, że przy założonych parametrach złożowych, technicznych oraz ekonomicznych będą przynosić realne zyski finansowe. Aby było to możliwe konieczna jest odpowiednia polityka proekologiczna państwa, która powinna polegać przede wszystkim na zapewnieniu odpowiednich zachęt ekonomicznych do inwestowania w odnawialne źródła energii (dotacje, kredyty inwestycyjne itp.), a także na wsparciu prawnym w postaci uproszczenia procedur administracyjnych i ochronie planistycznej złóż [Górecki (red.) 2006; Socha 2008; Socha i in. 2016].

Stan zagospodarowania zasobów wód termalnych w Polsce

W obszarze energii geotermalnej najważniejsze jest optymalne wykorzystywanie zasobów, które powinno być wszechstronne i obok ciepłownictwa obejmować także inne dziedziny gospodarki, między innymi rekreację, balneoterapię czy rolnictwo. Najbardziej efektywnym sposobem wykorzystania ciepła z wód termalnych jest wykorzystanie kaskadowe, które polega na zastosowaniu kilku odbiorników ciepła o coraz niższym zapotrzebowaniu na temperaturę i tym samym zagospodarowaniu energii geotermalnej do różnych celów, przy czym podstawowym kierunkiem zagospodarowania wód termalnych powinno być ciepłownictwo. Zgodnie ze stanem na 31.12.2020 r. w Polsce funkcjonowało sześć ciepłowni geotermalnych (**rysunek 4.1**) dysponujących 16 otworami, z których 9 przeznaczonych było do eksploatacji wód termalnych, natomiast 7 pozostałych służyło do zatłaczania wykorzystanych wód do górotworu. Wykorzystywana do ogrzewania woda charakteryzuje się temperaturą na wypływie od 41°C w Mszczonowie (otwór Mszczonów IG-1) do 86°C w Bańskiej Niżnej (otwór Bańska PGP-3). Wydajność eksploatowanych otworów wynosi od 60 m³/h w Mszczonowie do 550 m³/h w Bańskiej Niżnej (otwór Bańska PGP-1). Największymi łącznymi zasobami eksploatacyjnymi ujęć dysponuje PEC Geotermia Podhalańska S.A. – wynoszą one 1070 m³/h [Felter i in. 2021].

Ponadto w Koninie, gdzie stwierdzono wody termalne o temperaturze na wypływie równej 92°C, trwa budowa nowej ciepłowni geotermalnej. Poza ciepłowniami komunalnymi w Polsce funkcjonuje dodatkowo pięć ciepłowni lokalnych, ogrzewających pojedyncze budynki. Są one zlokalizowane w Bukowinie, Cieplicach, Cudzynowicach, Karpnikach i Kleszczowie (**rysunek 4.1**).

Popularnym sposobem wykorzystania wód termalnych jest zaopatrywanie uzdrowisk oraz ośrodków pełniących funkcje rekreacyjne. Do końca 2020 r. w Polsce istniało kilkanaście ośrodków rekreacyjnych wykorzystujących wody termalne i lecznicze termalne (**rysunek 4.1**). Wodę termalną wykorzystuje się również do celów rekreacyjno-leczniczych lub profilaktycznych w wielu uzdrowiskach i ośrodkach leczniczych. Znajdują one także zastosowanie w zabiegach kosmetycznych i pielęgnacyjnych [Felter i in. 2021]. W najbliższych latach spodziewany jest rozwój sektora rekreacji wykorzystującego wody termalne, zarówno z uwagi na duże zapotrzebowanie społeczeństwa, jak i lokalny rozwój gospodarczy miejscowości, w których takie ośrodki funkcjonują [Kurek i in. 2020a, b; Kępińska 2021]. Wody termalne mogą mieć również inne zastosowanie (**rysunek 4.1**). W rejonie Trzęsacza służą do hodowli ryb ciepłolubnych, a w Uniejowie podgrzewają boisko piłkarskie i ścieżki spacerowe. Na bazie wód termalnych wytwarzane są również kosmetyki oraz produkty spożywcze [Felter i in. 2021].

Wspieranie geotermii w Polsce i zadania na przyszłość

W ostatnich latach rząd podjął działania, które aktywnie wspierają rozwój geotermii w Polsce. Są to przede wszystkim programy pomocowe oferujące dotacje finansowe dla samorządów wyrażających chęć zagospodarowania potencjału geotermalnego na swoim terenie. Wsparcie samorządów zainteresowanych rozwojem geotermii odbywa się również na płaszczyźnie doradczej. Z inicjatywy Głównego Geologa Kraju Państwowa Służba Geologiczna wykonywała dla zainteresowanych jednostek samorządu terytorialnego bezpłatne opinie na temat potencjału geotermalnego możliwego do wykorzystania na ich terenie. Ekspertyczne opracowania z rekomendacjami na temat możliwych dalszych kroków inwestycyjnych w zakresie rozwoju ciepłownictwa geotermalnego otrzymało ponad 200 miast i gmin (według stanu na 30 września 2022 r.).

Jako spodziewane wyniki inwestycji w wykorzystanie energii wód termalnych należy rozumieć osiągnięty efekt ekologiczny w postaci zmniejszonej lub wyeliminowanej całkowicie niskiej emisji. W związku z tym środki finansowe na rozwój geotermii powinny być kierowane w pierwszej kolejności do samorządów, które posiadają infrastrukturę przesyłową i ciepłowniczą. Jak pokazują przykłady krajowe, za niską emisję odpowiada przede wszystkim produkcja ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w gospodarstwach domowych. Na podstawie danych z Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego (KOBIZE IOŚ–PIB), zestawionych z zasięgiem obszarów perspektywicznych występowania wód termalnych, można przyjąć, że tylko na Niżu Polskim w blisko 500 miejscowościach są sieci ciepłownicze oraz ciepłownie (o mocy powyżej 1 MW), w których do produkcji ciepła i ciepłej wody użytkowej wykorzystywany jest w znaczącej przewadze węgiel kamienny (niektóre obiekty wykorzystują do produkcji ciepła również gaz ziemny). Są to zatem lokalizacje mające infrastrukturę przesyłową ciepła i ciepłej wody użytkowej,

w których paliwo węglowe można potencjalnie zastąpić energią geotermalną. Barię technologiczną jest to, że w większości tych obiektów parametry zasilania i powrotu w sieciach opierają się na temperaturze 120°C/70°C, podczas gdy dla funkcjonowania ciepłowni geotermalnej korzystniejsze są parametry 90°C/70°C. Niemniej jednak w tej chwili już przynajmniej około 100 obiektów ma infrastrukturę ciepłowniczą, w której skutecznie można wdrożyć wykorzystanie ciepła geotermalnego [KOBiZE 2021]. Przytoczone dane pokazują jak znaczący potencjał geotermalny jest możliwy do zagospodarowania w naszym kraju. W latach 2017-2020 Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) prowadził prace badawcze mające na celu wskazanie lokalizacji najbardziej predysponowanych do zagospodarowania potencjału geotermalnego w kategorii miejscowości do 50 tys. mieszkańców zlokalizowanych na obszarze Niżu Polskiego. Wyniki prowadzonych prac pozwoliły wytypować w każdej jednostce samorządu terytorialnego, w których warunki hydrogeologiczne i złożowe pozwalają wykorzystywać potencjał geotermalny w pierwszej kolejności do celów energetycznych, a na dalszych etapach również w rekreacji, balneoterapii czy w rolnictwie. Takie podejście do oceny efektywności ekonomicznej wykorzystania energii wód termalnych w prowadzonych przez PIG-PIB pracach wymagało również przeprowadzenia analizy rentowności inwestycji. Analiza ta wykazała, że inwestycje geotermalne wykazują największą rentowność wtedy, gdy potencjał złóż wód termalnych wykorzystywany jest w pierwszej kolejności do celów ciepłowniczych, co sprzyja ograniczeniu emisji i poprawia stan atmosfery, a w kolejnych krokach do celów rekreacyjnych i leczniczych, generując w ten sposób ruch turystyczny, który z kolei napędza rozwój gospodarczy poprzez rozwój sektora usług i handlu [Socha (red.) 2020a]. Wydaje się, że aby móc przedstawić w pełni wiarygodny bilans korzyści wynikających z zastąpienia paliw konwencjonalnych (zwłaszcza węgla) przez energię geotermalną, konieczne jest również przeprowadzenie analizy kosztów leczenia chorób związanych z nadmierną ekspozycją na szkodliwe czynniki mieszkańców gmin szczególnie dotkniętych problemem smogu. Do tej pory takie badania nie były prowadzone, a z pewnością mogłyby stać się koronnym argumentem za jak najszybszym odchodzeniem od węgla w samorządowych systemach ciepłowniczych. Sytuacja geopolityczna w Europie spowodowała intensyfikację działań wielu państw na rzecz niezależności energetycznej. Niezależność ta rozumiana jest jako dywersyfikacja źródeł dostaw, ale również jako szybsze odchodzenie od paliw konwencjonalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii. Trend ten w samej istocie pożyteczny i konieczny nie powinien być jednak z góry narzucany, ponieważ miksy energetyczne poszczególnych krajów różnią się od siebie bardzo istotnie. W Polsce energia geotermalna nie zastąpi z pewnością w całości tej uzyskiwanej z innych źródeł, jednak może i powinna stać się jednym z głównych elementów miksu energetycznego.

■ Podsumowanie

Zanieczyszczenie środowiska, z którym zmagają się współczesne społeczeństwa, związane jest przede wszystkim z sektorem energetycznym, przy czym nowego podejścia do tego zagadnienia wymaga nabierający coraz większego znaczenia problem występowania tzw. niskiej emisji.

Głównym źródłem występowania niskiej emisji są procesy produkcji ciepła dla potrzeb centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w gospodarstwach domowych (GIOŚ 2017; Socha 2020a). Skutkami oddziaływania niskiej emisji na środowisko naturalne są między innymi kwaśne deszcze, dziura

ozonowa a także globalne ocieplenie. Szczególną uwagę w tym kontekście należy jednak zwrócić na pogorszenie stanu zdrowia ludzi. Substancje zanieczyszczające mogą być bowiem przyczyną pojawienia się lub nasilenia wielu chorób układu oddechowego, jak również zaburzeń centralnego układu nerwowego. Na szkodliwe działanie powstających w wyniku niskiej emisji substancji szczególnie narażone są dzieci oraz osoby starsze.

Przy tak zdefiniowanym problemie naturalnym jest poszukiwanie rozwiązań w zakresie modernizacji źródeł ciepła, w tym rozwoju lokalnych sieci ciepłowniczych wykorzystujących odnawialne źródła energii, przede wszystkim energię geotermalną. Specyfika pracy ciepłowni geotermalnej powoduje, że nie emituje ona substancji zanieczyszczających do powietrza lub robi to w znikomym sposób. Rola ciepłowni geotermalnych w prezentowanym kontekście wydaje się być zatem kluczowa (Socha 2020a).

Energia geotermalna w porównaniu z innymi odnawialnymi źródłami energii charakteryzuje się wysoką stabilnością, gdyż można pozyskiwać ją w sposób ciągły, w odróżnieniu od chociażby energii słonecznej i wiatrowej, których wykorzystanie ściśle zależy od warunków atmosferycznych. Ponadto prawidłowe wykonanie otworów wiertniczych (eksploatacyjnego i chłonnego) wywiera stosunkowo niewielki wpływ na krajobraz i środowisko naturalne. Polska należy do krajów o znacznym potencjale możliwości pozyskiwania energii geotermalnej z wód termalnych do celów ciepłowniczych [Ciechanowicz, Szczukowski 2006; Biernat i in. 2009; Bociek 2009; Bujakowski 2009; Sala 2018, Socha (red) 2020a]. Wartością dodaną jest ponadto możliwość wykorzystania zmineralizowanych wód termalnych do innych celów. Kaskadowy sposób zagospodarowania wód termalnych pozwala na ich wykorzystanie do celów energetycznych, a uzupełniająco, na dalszych etapach, również do celów rekreacyjnych i leczniczych oraz m.in. w rolnictwie, do suszenia drewna, ogrzewania murawy boiska czy chodników.

W Polsce, mimo dużego wzrostu zainteresowania ujmowaniem i zagospodarowaniem wód termalnych do celów ciepłowniczych, w 2020 r. energia geotermalna stanowiła zaledwie 0,2% udziału w pozyskaniu energii ze źródeł odnawialnych. Z wód termalnych uzyskano 1 073 TJ energii [Berent-Kowalska i in. 2021].

Zdynamizowanie rozwoju wykorzystania energii geotermalnej w ciepłownictwie będzie odpowiadać na wyzwania związane z niezależnością i suwerennością energetyczną. Jednocześnie będzie to impuls wpływający na poprawę jakości życia mieszkańców, wynikającą z lepszej jakości powietrza. Energia geotermalna, oprócz przewagi nad innymi OZE w postaci dostępności bez względu na porę dnia i pogodę, ma jeszcze jedną niezwykle ważną zaletę, która powinna być uwzględniana przez samorządy przy opracowywaniu strategii ograniczania emisji na swoim terenie. Jest to wysoka akceptacja społeczna dla tego typu instalacji, która jest jednocześnie gwarantem powodzenia inwestycji.

Literatura:

Berent-Kowalska G., Jurgaś A., Kacprowska J., Szymańska M., Moskal I. 2021. Energia ze źródeł odnawialnych. GUS, Warszawa.

Biernat H., Kulik S., Noga B. 2009. Możliwości pozyskiwania energii odnawialnej i problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. Przegląd Geologiczny. Vol. 57, nr 8, 655-656.

- Bociek Z. 2009. Koncepcja rozwoju ciepłowni geotermalnych wspomagających miejskie systemy ciepłownicze, *Przegląd Geologiczny*. Vol. 57, nr 8, 648.
- Bujakowski W. 2009. Wykorzystanie wód geotermalnych w Polsce. *Przegląd Geologiczny*. Vol. 57, nr 8, 643.
- Chmura K., Chudek M. 2000. *Geotermomechanika górnicza*. Wyd. Suplement, Mikołów.
- Chowaniec J. 2006. Hydrogeologia Karpat. *Przegląd Geologiczny*. Vol. 54, nr 10, 846-847.
- Ciechanowicz W., Szczukowski S. 2006. Paliwa i energia XXI wieku szansą rozwoju wsi i miast. Oficyna Wydawnicza WAT, Warszawa.
- Dowgiało J., Fistek J. 2008. Wody mineralne. Prowincja sudecka. [W:] *Hydrogeologia regionalna Polski t. 2, Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane*, 57-77.
- Dowgiało J., Paczyński B. 2002. Podział regionalny wód leczniczych Polski. [W:] *Ocena zasobów dyspozycyjnych wód potencjalnie leczniczych*. Poradnik metodyczny (red. B. Paczyński): 17-23. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Felter A., Filippovits E., Gryszkiewicz I., Lasek-Woroszkiewicz D., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Sosnowska M., Stożek J. 2021a. Mapa Zagospodarowania Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2019 r. Tekst objaśniający do mapy w skali 1: 1 000 000. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Filippovits E., Gryszkiewicz I., Lasek-Woroszkiewicz D., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Sosnowska M., Stożek J. 2021b. Mapa Zagospodarowania Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r. Tekst objaśniający do mapy w skali 1: 1 000 000. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Stożek J., Gryczko-Gostyńska A. 2015. Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce. Tekst objaśniający. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Stożek J., Gryczko-Gostyńska A. 2016. Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce 2015. Tekst objaśniający. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Stożek J., Gryczko-Gostyńska A. 2017. Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce 2016. Tekst objaśniający. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Stożek J., Gryszkiewicz I., Gryczko-Gostyńska A. 2018. Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce 2017. Tekst objaśniający. PIG-PIB, Warszawa.
- Felter A., Skrzypczyk L., Socha M., Sokołowski J., Sosnowska M., Stożek J., Gryszkiewicz I., Wrzosek A. 2019. Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce 2018. Tekst objaśniający. PIG-PIB, Warszawa.
- Filippovits E., Socha M. 2021. Inwestycje geotermalne jako element strategii rozwoju jednostek samorządu terytorialnego – próba identyfikacji i barier rozwoju geotermii w Polsce. Książka rozszerzonych abstraktów. VII Ogólnopolski Kongres Geotermalny, 28-30 IX 2021, 64-67.
- GIOŚ. 2017. Stan środowiska w Polsce. Sygnały 2016, Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Górecki W. (red.) 2006. Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Formacje mezozoiku. AGH, Kraków.
- Górecki W. (red.) 2011. Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. AGH, Kraków.
- Górecki W. (red.) 2012. Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego. AGH, Kraków.
- Górecki W. (red.) 2013. Atlas geotermalny Karpat Wschodnich. AGH, Kraków.
- Kępińska B. 2016. Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej w Polsce w latach 2013-2015. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój*. Tom 55, nr 1, 19-35.
- Kępińska B. 2018. Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej w Polsce w latach 2016-2018. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój*. Tom 57, nr 1, 11-27.

Kępińska B. 2021. Wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce w latach 2019-2021. *Przegląd Geologiczny*. Vol. 69, nr 9, 559-565.

Kępińska B. (red.) 2017. Energia geotermalna – podstawa niskoemisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju – wstępne studnia możliwości dla wybranych obszarów w Polsce. Raport z wizyt studyjnych. Iceland Liechtenstein Norway grants.

KOBIZE 2021. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisją. Dane z Krajowej bazy o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancjach.

Kołąkowski T.E. 2015. Postrzeganie teraźniejszości. Czy ustawa o OZE wprowadza system wsparcia ciepłownictwa geotermalnego? *Energetyka. Problematyka energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej*, nr. 4/2015, Wstęp. <https://elektroenergetyka.pl> (dostęp w dn.: 01.04.2022).

Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania. Ministerstwo Aktywów Państwowych, Warszawa, 2019.

Kurek K., Heijman W., Van Ophem J., Gędek S., Strojny J. 2020a. Geothermal spas as a local development factor, the case of Poland. *Geothermics*, 85: 101777.

Kurek K., Heijman W., Van Ophem J., Gędek S., Strojny J. 2020b. The impact of geothermal resources on the competitiveness of municipalities: evidence from Poland. *Renewable Energy*, 151: 1230-1239.

Muffler P., Cataldi r. 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7 (2-4), 53-89.

Noga B., Biernat H., Kapuściński J., Martyka P. 2013. Analiza parametrów otworów geotermalnych wykonanych na Niżu Polskim pod kątem możliwości budowy siłowni binarnych wykorzystujących ciepło wnętrza Ziemi. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*. nr 2/2013, 127-139.

Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r. *Monitor Polski*, poz. 264.

Paczyński B., Płochniewski Z. 1996. *Wody mineralne i lecznicze Polski*. Państw. Inst. Geol., Warszawa. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. 2016 poz. 2033).

Sala K. 2018. Przemysłowe wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce na przykładzie geotermalnego zakładu ciepłowniczego w Bańskiej Niżnej, *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*. Tom 32, nr 2, 73-82.

Skrzypczyk L. 2001. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2000 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L. 2002. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2001 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L. 2003. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2002 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L. 2004. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2003 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L. 2005. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2004 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L. 2006. *Wody podziemne*. [W:] Przeniosło S., Malon A. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2005 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2007. *Wody podziemne*. [W:] Gientka M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2006 r. PIG, Warszawa.

Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2008. *Solanki, wody lecznicze i termalne*. [W:] Gientka M., Malon A., Dyląg J. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2007 r. PIG, Warszawa.

- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2009. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Wołkowicz S., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2008 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2010. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Wołkowicz S., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2009 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2011. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce wg stanu na 31 XII 2010 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2012. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2011 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2013. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2012 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2014. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2013 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2015. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2014 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2016. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2015 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J. 2017. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2016 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Skrzypczyk L., Sokołowski J., 2019. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2018 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Socha M. 2008. Geośrodowiskowe uwarunkowania wykorzystania energii wód termalnych paleogeńsko-mezozoicznego zbiornika podhalańskiego. Praca doktorska. Archiwum Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.
- Socha M. (red.) 2020a. Ocena potencjału energetycznego i surowcowego wód termalnych i leczniczych termalnych w wybranych obszarach zurbanizowanych wraz z analizą geośrodowiskowych oraz ekonomicznych uwarunkowań ich zagospodarowania. PIG-PIB, Warszawa.
- Socha M. (red.) 2020b. Wody jako kopalina. [W:] Szamałek K., Szuflicki M., Mizerski W. (red.) Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Socha M., Sadurski A., Skrzypczyk L. 2016. Możliwości wykorzystania energii geotermalnej w rejonie aglomeracji warszawskiej na tle analizy kosztów finansowych. Przegląd Geologiczny 2016, Vol. 64, nr 7, 481-488.
- Sokołowski J., Skrzypczyk L. 2018. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2017 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Sokołowski J., Skrzypczyk L., 2020. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2019 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Sokołowski J., Skrzypczyk L., 2021. Solanki, wody lecznicze i termalne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Szewczyk J. 2010. Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermalnej w Polsce. Przegląd Geologiczny. Vol. 58, nr 7, 566-573.
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2022 poz. 1072 t.j.).
- Zabłocki M. 2013. Determinanty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój. Nr 2/2013, 29-44.

Rozdział 5

Magazynowanie i składowanie substancji w strukturach geologicznych

dr inż. Adam Wójcicki

mgr Jarosław Zacharski

dr hab., prof. PIG–PIB Grzegorz Czapowski

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Wstęp

Niniejsza praca zawiera podsumowanie wykonanych dotychczas i aktualnie realizowanych w Polsce (w tym w szczególności z udziałem Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego) badań i publikacji dotyczących rozpoznania struktur geologicznych pod kątem podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania substancji, nawiązujących do priorytetów „Polityki energetycznej Polski do 2040 r.” [PEP2040 2021] oraz „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” [Polska... 2021]. Praca omawia problematykę podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji – nośników energii (gazu ziemnego, wodoru, wodoru + gazu ziemnego, sprężonego powietrza) w sczerpanych złożach węglowodorów, kawernach wytworzonych w wysadach solnych i pokładach soli oraz w głęboko występujących wodonośnych poziomach solankowych. Ponadto przedstawiono w niej zagadnienia podziemnego składowania dwutlenku węgla w strukturach geologicznych.

Magazynowanie gazu ziemnego zasadniczo nie wpisuje się w cel osiągnięcia neutralności klimatycznej polskiej gospodarki. Jednakże doświadczenia polskie (i światowe) w zakresie budowy i eksploatacji takich magazynów będą niezwykle przydatne przy budowie podobnych magazynów w strukturach geologicznych. W obecnej sytuacji geopolitycznej magazynowanie gazu ziemnego jest ciągle niezwykle istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezależności energetycznej kraju.

Magazynowanie wodoru (a także mieszanin wodoru i gazu ziemnego) stanowi element wsparcia rozwoju łańcucha gospodarki wodorowej, w tym równoważenia pracy sieci elektroenergetycznej poprzez wykorzystanie nadwyżki energii z OZE (odnawialnych źródeł energii) do produkcji zielonego wodoru. Wiąże się to też z wykorzystaniem błękitnego wodoru produkowanego z paliw kopalnych z wykorzystaniem technologii CCS/CCUS/CCT (Carbon Capture and Storage/Carbon Capture Use and Storage/Clean Coal Technologies – wychwytywania i składowania dwutlenku węgla / wychwytywania, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla/czystych technologii węglowych) [Polska... 2021]. Analogicznie magazynowanie sprężonego powietrza również może być stosowane w celu przechwytywania i przechowywania nadwyżki energii z OZE, która jest potem możliwa do wykorzystania w okresach ograniczonej podaży [PEP2040 2021].

Polityka energetyczna Polski a magazynowanie i składowanie substancji

W przyjętej w lutym 2021 r. przez rząd Polski „Polityce Energetycznej Polski do 2040 r.” [PEP2040 2021] oraz przyjętej w listopadzie 2021 r. „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” [Polska... 2021] ujęte są m.in. zagadnienia magazynowania (nośników) energii oraz składowania i wykorzystania dwutlenku węgla (CCS/CCUS). Strategie te są wytycznymi do realizacji długoterminowego celu tzn. osiągnięcia w dalszej perspektywie neutralności klimatycznej gospodarki narodowej i obejmują rozwój technologii zeroemisyjnych i pomostowych. Wspomniane zagadnienia dotyczą w szczególności wsparcia rozwoju łańcucha gospodarki wodorowej (wytwarzanie, magazynowanie, dystrybucja, wykorzystanie wodoru i jego pochodnych) i technologii magazynowania energii z OZE. Obejmują ponadto, jako technologię pomostową, umożliwiającą stopniowe przejście do gospodarki niskoemisyjnej, produkcję wodoru z paliw kopalnych z wykorzystaniem technologii CCS/CCUS/CCT. Uzasadnieniem dla wykorzystania technologii CCS/CCUS/CCT przy produkcji wodoru z paliw kopalnych jest możliwość ograniczenia stosunkowo wysokiej emisji dwutlenku węgla powstającej w stosowanych procesach: reformingu parowego węglowodorów oraz gazyfikacji węgla [Polska... 2021]. Jednocześnie w przyjętej polityce energetycznej [PEP2040 2021] stosunkowo dużo miejsca poświęca się zagadnieniom wykorzystania gazu ziemnego jako paliwa pomostowego (przejściowego) w okresie transformacji energetycznej, dywersyfikacji jego dostaw i rozbudowie infrastruktury sieciowej (dystrybucji i magazynowania). W polityce tej wiele uwagi poświęca się też rozwojowi rynku gazu ziemnego, co obejmuje polski cel strategiczny, jakim jest regionalne centrum przesyłu i handlu gazem ziemnym (tzw. hub gazowy) w naszej części Europy.

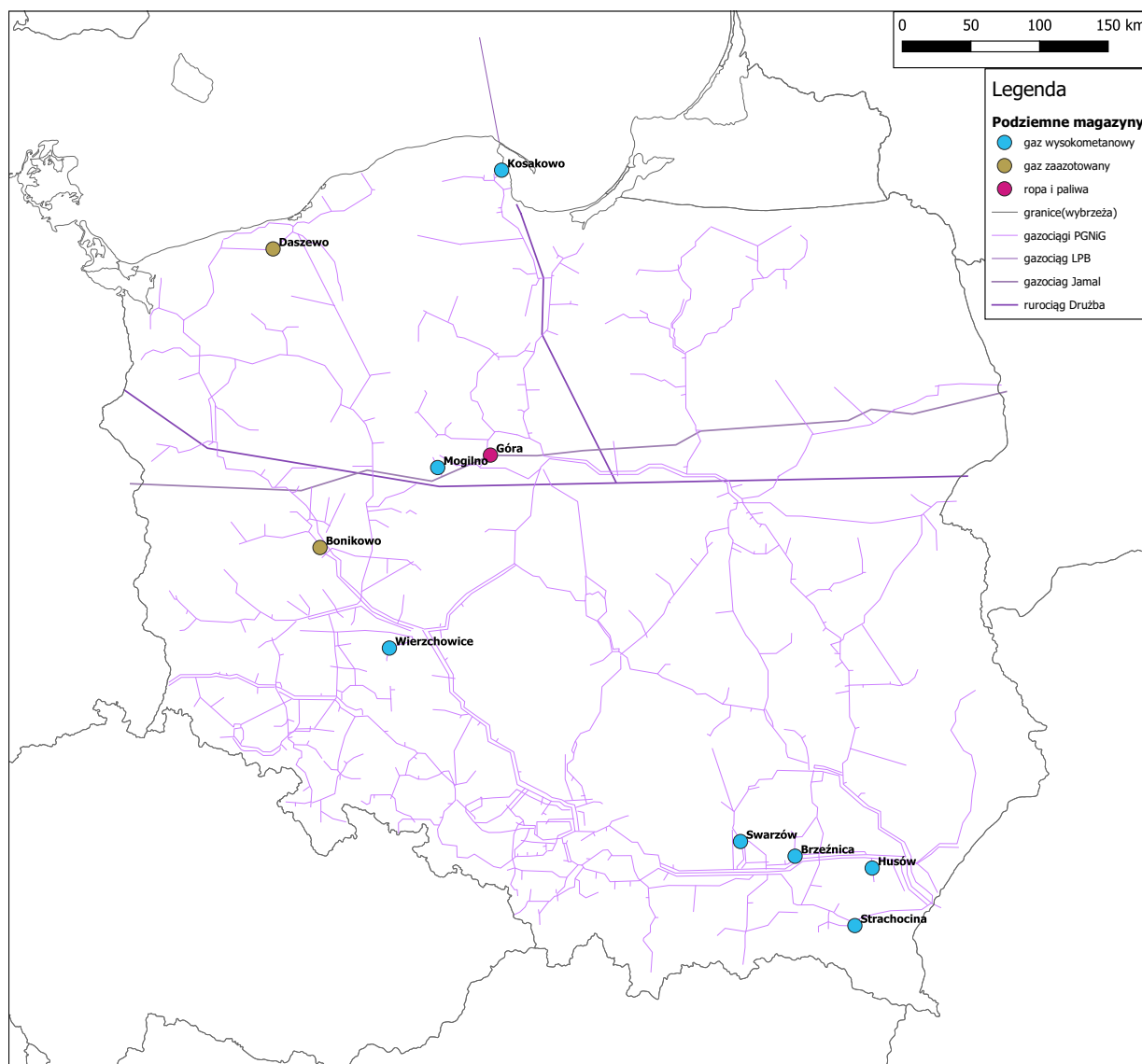
Ministerstwo Klimatu i Środowiska przygotowało założenia do aktualizacji PEP2040 z 2021 r. Są to Założenia do aktualizacji PEP2040 2022, przyjęte przez Radę Ministrów 29 marca 2022 r. [Założenia... 2022]. Zawierają one dotychczasowe priorytety dla transformacji energetycznej w kierunku gospodarki niskoemisyjnej. Są nimi: dalszy rozwój OZE, poprawa efektywności energetycznej, dywersyfikacja dostaw węglowodorów i ich alternatyw, rozwój energetyki jądrowej oraz sieci i magazynowania energii (w tym wodoru jako nośnika energii). Ponadto położono nacisk na optymalne

wykorzystanie zasobów krajowych oraz racjonalne wykorzystanie energetyki węglowej i zasobów węgla na potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego państwa.

We wspomnianych wyżej dokumentach [PEP2040 2021; Polska... 2021; Założenia... 2022] nie poruszono problematyki wykorzystania struktur geologicznych do realizacji priorytetów odnośnych polityk, co wynika ze znacznego stopnia ogólności tych dokumentów. Generalnie można stwierdzić, że magazynowanie wymienionych wcześniej nośników energii może być realizowane na wiele sposobów, w tym w odpowiednio szczelnych strukturach geologicznych [Letcher 2020]. Dla przykładu wodór, który sam jest „magazynem” energii, może być przechowywany w sztucznych zbiornikach (w fazie gazowej lub ciekłej), względnie wiązany przez absorpcję, adsorcję i reakcje chemiczne. Może też, co jest przedmiotem niniejszego artykułu, być magazynowany w podziemnych strukturach geologicznych, najczęściej w sztucznych kawernach wytworzonych w wysadach lub pokładach solnych [Letcher 2020], rzadziej zaś zatłaczany w szcerpane złoża gazu ziemnego lub wodonośne struktury solankowe [Zivar i in. 2021]. Wymienione struktury geologiczne są zarazem miejscem podziemnego magazynowania gazu ziemnego, szerzej omówionego w kolejnym podrozdziale. Struktury te mogą też służyć do magazynowania sprężonego powietrza, z tym, że dotychczasowe doświadczenia na świecie w tym przedmiocie obejmują jedynie wykorzystanie kawern w strukturach solnych [Letcher 2020]. Z kolei składowanie dwutlenku węgla najczęściej prowadzi się w szcerpanych złożach węglowodorów i w wodonośnych strukturach solankowych [IPCC 2005], przy czym większość aktualnie funkcjonujących na świecie w skali przemysłowej projektów CCS/CCUS powiązana jest z zabiegami wspomagania wydobywania węglowodorów, głównie ropy naftowej (CO_2 -EOR; Enhanced Oil Recovery) [GCCSI 2021].

■ Magazynowanie gazu ziemnego (i innych nośników energii, w szczególności wodoru)

Wykorzystywanie podziemnych magazynów zapoczątkowano na świecie najpierw w USA w 1916 r., wykorzystując do tego celu szcerpane złoża gazu. Pierwszy magazyn w strukturze zawodnionej w poziomach wodonośnych solankowych wybudowano również w USA w roku 1946 [Gas... 2022]. Obecnie najbardziej rozpowszechnioną w Polsce działalnością w zakresie magazynowania substancji (nośników energii) jest przechowywanie gazu ziemnego w podziemnych magazynach gazu (PMG). Bezzbiornikowe, podziemne magazynowanie gazu w strukturach geologicznych stosowane jest w Polsce od 1954 r. [Gas... 2022]. W tym celu wykorzystano szcerpaną część złoża gazu ziemnego i ropy naftowej Roztoki, położonego w pobliżu Jasła w województwie podkarpackim. Magazyn ten funkcjonował do 1980 r.



Źródło: opracowanie własne na podstawie [PGNiG 2022; Wójcicki i in. 2013].

Rysunek 5.1. Funkcjonujące podziemne sezonowe magazyny gazu ziemnego oraz ropy naftowej i paliw w Polsce

Obecnie gaz ziemny wysokometanowy magazynuje się w Polsce (**rysunek 5.1**) w pięciu szcerpanych złożach gazu (Wierzchowice, Swarzów, Brzeźnica, Strachocina i Husów), w kawernach ulokowanych w wysadzie solnym (Mogilno) i w pokładzie soli (Kosakowo). Operatorem tych magazynów jest Gas Storage Poland z grupy PGNiG S.A.

Ponadto w kawernach w wysadzie solnym Góra magazynowane są paliwa i ropa naftowa. W tym przypadku operatorem jest IKS Solino, spółka z GK Orlenu [Zacharski i in. 2021].

W przypadku szcerpanych złóż gazu największą pojemnością magazynową (pojemność czynna/robocza) charakteryzuje się złożo Wierzchowice występujące w utworach wapienia cechsztyńskiego

i czerwonego spągowca (1,3 mld m³; głębokość 1550 m p.p.t.). Kolejne magazyny to: Husów (wyeksploatowana część złoża w utworach miocenu, wchodzącego w skład dużego złoża gazu Husów – Albigowa – Krasne; 0,5 mld m³; głębokość 1275 m p.p.t.), Strachocina (0,36 mld m³; 847 m p.p.t.; utwory kredy górnej płaszczowin karpackich), Brzeźnica (0,1 mld m³; 394 m p.p.t.; miocen) i Swarzędz (0,09 mld m³; 670 m p.p.t.; utwory miocenu). Magazyny kawernowe w wysadzie solnym Mogilno i w pokładzie soli kamiennej Mechelinki (magazyn Kosakowo) charakteryzują się pojemnością odpowiednio 0,585 i 0,3 mld m³ oraz głębokością występowania kawern odpowiednio 600 i 970 m p.p.t. [Gas... 2022; Zacharski i in. 2021]. Wszystkie powyższe 7 PMG (**rysunek 5.1**) to magazyny sezonowe, umożliwiające zmagazynowanie gazu w ilości wynoszącej w sumie 3,285 mld m³, odpowiadającej około dwumiesięcznemu zapotrzebowaniu gospodarki narodowej (rezerwa na zwiększone potrzeby w trakcie sezonu grzewczego).

Ponadto funkcjonują w Polsce dwa magazyny gazu zaazotowanego w szcerpanych złożach węglowodorów Bonikowo i Daszewo wykorzystujące utwory cechsztynu. Ich sumaryczna pojemność to ok. 0,26 mld m³; głębokość występowania magazynów to odpowiednio 2261 i 2778 m p.p.t.. Służą one stabilizacji wydobycia gazu ziemnego i współpracują z podsystemami gazu zaazotowanego [Gas... 2022; PGNiG 2022].

Dla porównania pojemność czynna wszystkich PMG na świecie jest rzędu 417 mld m³, [Cornot-Gandolphe 2018]. W 2018 r. takich magazynów było 671, z tego około 73% stanowiły magazyny w szcerpanych złożach węglowodorów, głównie gazu ziemnego, 16% magazynów stanowiły kawerny solne (w wysadach lub pokładach soli) a 11% – wodonośne struktury solankowe. Udział magazynów w kawernach solnych w pojemności czynnej był nieco mniejszy z uwagi na wyższą pojemność magazynową wodonośnych struktur solankowych oraz szcerpanych złóż gazu, natomiast znacząco wyższa była w przypadku kawern szybkość (i efektywność: dla gazu bliska 90% w porównaniu z 50-70% w przypadku szcerpanych złóż węglowodorów [Brańka 2008; Gąska i in. 2012]) oraz wysoka w przypadku zatłoczonych paliw [Jasiński, 2004; Maciejewski 2008]) odzysku gazu z magazynu. W Europie udział magazynów w kawernach solnych w ilości wszystkich magazynów i pojemności magazynowej jest nieco większy niż średnia światowa i ich sumaryczna czynna pojemność magazynowa PMG (bez ZBiR) wynosi około 1/3 pojemności światowej [Cornot-Gandolphe 2018; Zacharski i in. 2021].

Z powyższych informacji oraz priorytetów długoterminowych polityk rządu Polski omówionych w poprzednim podrozdziale wynika konieczność rozbudowy krajowej pojemności magazynowej dla gazu (podziemnej infrastruktury magazynowej). Działania takie były i są planowane przez krajowe firmy we współpracy z partnerami naukowo-badawczymi.

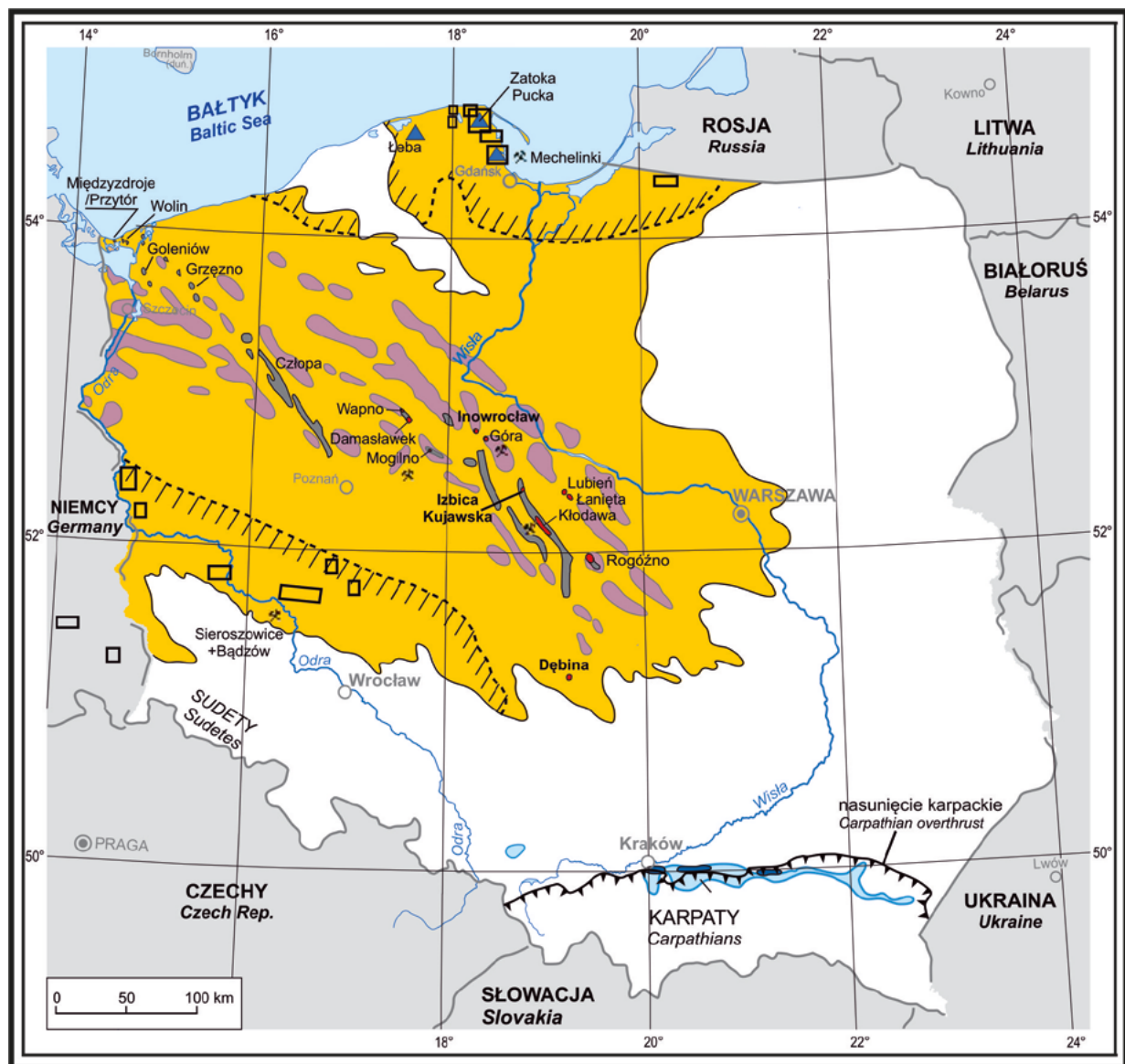
Rozbudowa podziemnej infrastruktury magazynowej gazu jest uwarunkowana rozpoznaniem i oceną możliwości wykorzystania podziemnych struktur geologicznych do celów magazynowania tego medium. Wstępne analizy są często realizowane przez jednostki naukowo-badawcze w różnym stopniu współpracujące z partnerami przemysłowymi. Państwowa służba geologiczna, której zadanie wypełnia Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, wykonuje rozpoznanie

i analizę struktur geologicznych jako potencjalnych obiektów lokowania podziemnych magazynów i składowisk. Odbywa się to w ramach realizacji zadań państwa w zakresie geologii.

Prace PIG-PIB dotyczące rozpoznania struktur solnych w Polsce odgrywają tu bardzo istotną rolę. Jak wspomniano wcześniej, w strukturach solnych, tzn. wysadach solnych i złożach pokładowych soli kamiennej można lokować kawerny na potrzeby magazynowania gazu ziemnego, ale także innych mediów (wodoru, mieszanin wodoru z gazem ziemnym oraz sprężonego powietrza) [Czapowski 2019; Letcher 2020]. Pokłady cechsztyńskiej soli kamiennej występujące na głębokości do 1-1,5 km na terenie północnej i północno-zachodniej Polski (**rysunek 5.2**) charakteryzują się odpowiednio dużą miąższością (co najmniej 100-150 m), co czyni je optymalnymi m.in. do lokowania kawern do magazynowania wodoru, ale także gazu ziemnego (przykładem jest PMG Kosakowo) czy też mieszanin wodoru i gazu ziemnego. Jednocześnie w północno-zachodniej i centralnej Polsce występują liczne poduszki i wysady solne. Najbardziej korzystne do celów magazynowania są relatywnie płytko występujące wysady solne. Wykorzystano je do budowy obecnie funkcjonujących kawernowych magazynów: PMG Mogilno oraz podziemnego magazynu ropy i paliw (PMRiP) Góra, zaś pozyskaną w procesie ługowania solankę wykorzystuje się na miejscu w procesie wytłaczania gazu/ropy/paliw oraz w zakładzie przetwórczym koło Inowrocławia.

Potencjał magazynowy Polski obejmuje kolejne 11, częściowo rozpoznanych, ale wciąż niezagospodarowanych dotąd wysadów zalegających na głębokościach do 1 km (niektóre z nich były rozpatrywane w ostatnich latach pod kątem przydatności na PMG – np. Damasławek w powiecie wągrowieckim i Lubień Kujawski w powiecie włocławskim) oraz głębiej występujących 14 wysadów [Tarkowski, Czapowski 2018; Zacharski i in. 2021].

Kolejnym typem struktur geologicznych wykorzystywanych do magazynowania gazu ziemnego (oraz innych substancji – nośników energii) są szcerpane złoża węglowodorów, przy czym, ze względu na ich specyfikę, wykorzystuje się tu głównie szcerpane złoża gazu ziemnego [Letcher 2020]. Oprócz wykorzystania i planów rozbudowy istniejących PMG w szcerpanych złożach polski przemysł naftowy (PGNiG S.A.) rozpatrywał wiele innych złóż o wysokim stopniu szcerpania, traktując je również jako możliwe do wykorzystania na PMG (np. złoża gazu Brzostowo, Czeszów i Żuchłów w utworach czerwonego spągowca [Piesik-Buś, Zamojcin 2015]). Szcerpane złoża gazu ziemnego i ropy naftowej były też, wraz z wodonośnymi strukturami solankowymi, analizowane pod kątem przydatności do podziemnego geologicznego składowania dwutlenku węgla w ramach wielu przedsięwzięć finansowanych ze środków publicznych. Najbardziej wyczerpujące i całościowe analizy zostały dotychczas wykonane w ramach przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” (2008-2012) [Wójcicki i in. 2013], omówionego szerzej w dalszej części rozdziału. Ponadto w ramach realizowanego w latach 2015-2016 projektu unijnego ESTMAP (program Horyzont 2020) zinwentaryzowano i przedstawiono informacje na temat istniejących i planowanych magazynów (nośników) energii w Europie, w tym na obszarze Polski [ESTMAP 2016]. Prace te mają być kontynuowane m. in. w ramach wspólnych przedsięwzięć europejskich służb geologicznych.



- poduszka solna
salt pillow
- Dębina**
 wysad solny przebijający nadkład mezozoiczny
salt diapir pierced through Mesozoic cover
- Wolin**
 wysad solny przebijający się częściowo przez nadkład mezozoiczny
salt diapir partially pierced through Mesozoic cover
- obecny obszar występowania permskich ewaporatów
recent extent of Permian evaporites
- obecny obszar występowania soli miocenijskich
recent extent of Miocene salts
- obszary optymalne i perspektywiczne do lokowania kawern magazynowych wodoru
optimal and prospective areas for location of hydrogen storage caverns
- granica wystąpień zasobów przewidywanych pokładowych soli permskich (głębokość spągu soli do 2 km)
limit of stratiform Permian salts with predicted resources (bottom depth 2 km)
- Łeba**
 udokumentowane złożo soli kamiennej w północnej Polsce
recovered rock salt deposit in northern Poland
- czynna kopalnia soli
active salt mine

Źródło: [Czapowski 2019].

Rysunek 5.2. Struktury solne w Polsce, w tym odpowiednie do magazynowania wodoru jako nośnika energii

Geologiczne składowanie dwutlenku węgla

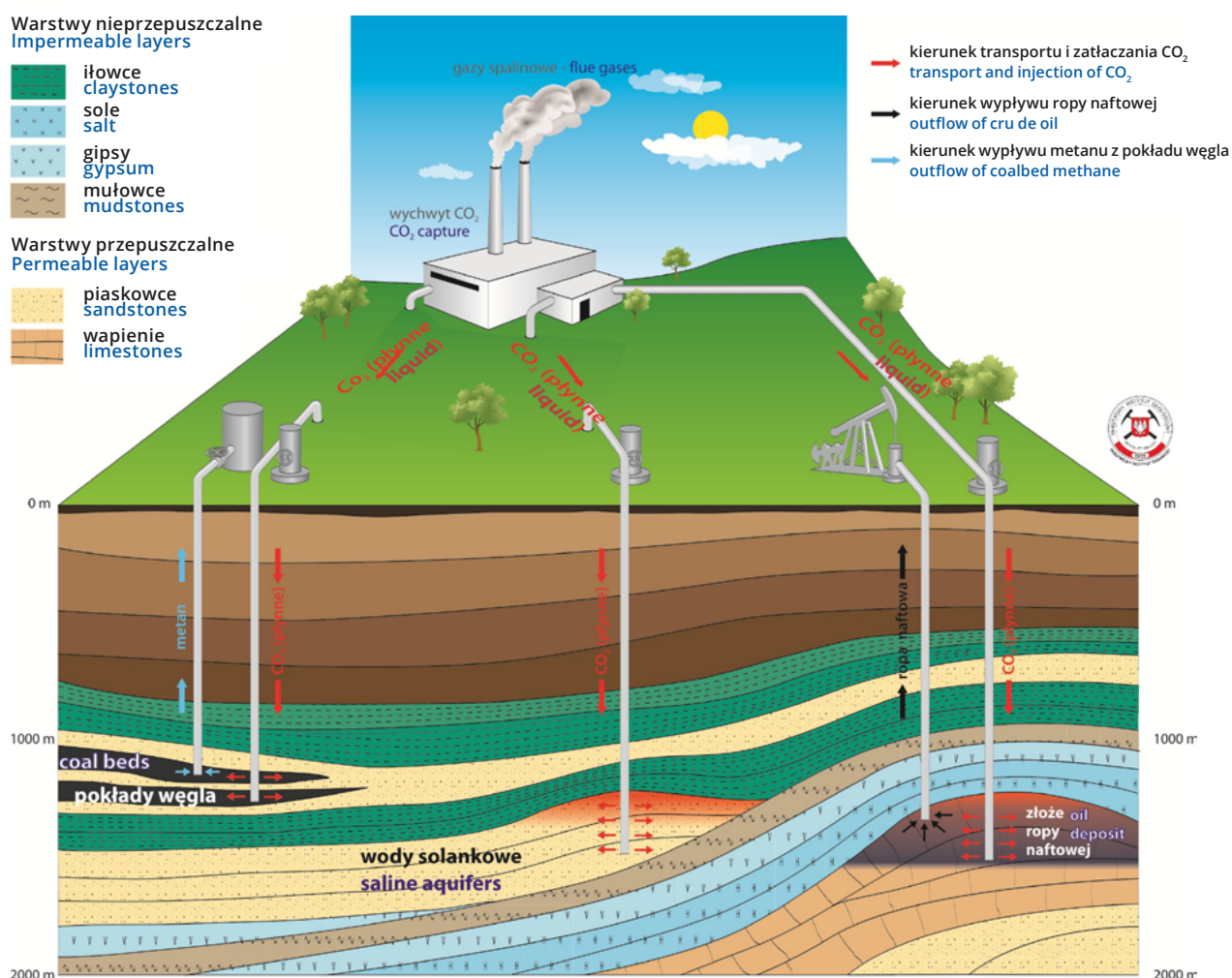
Podziemne geologiczne składowanie dwutlenku węgla jest elementem technologii CCS/CCUS – Carbon Capture and Storage/Carbon Capture and Utilization and Storage. Oznacza ona wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla / wychwytywanie i wykorzystanie oraz składowanie dwutlenku węgla; czasami używany jest też termin „geologiczna sekwestracja dwutlenku węgla” [GCCSI 2021; IPCC 2005; Wójcicki i in. 2013]. Zatlaczanie CO₂ do górotworu nie jest procesem nowym i stosuje się go od półwiecza w przemyśle naftowym [Lake, Walsh 2008]. Proces ten był szczególnie przydatny w zabiegach wspomaganiania wydobycia ropy naftowej (CO₂-EOR). Źródłem dwutlenku węgla były początkowo jedynie naturalne „złoża” względnie procesy oczyszczania gazu ziemnego z niepożądanych domieszek (głównie dwutlenku węgla) obniżających jego wartość energetyczną. W ostatnich dwóch dekadach rozwijano natomiast połączenie technologii wychwytywania CO₂, pochodzącego ze spalania paliw kopalnych w elektrowniach lub innych dużych instalacjach przemysłowych, z jego transportem w celu składowania/wykorzystania w formacjach i strukturach geologicznych o odpowiedniej pojemności (przykładem wykorzystania jest technologia CO₂-EOR). Jest to forma redukcji przemysłowych emisji dwutlenku węgla [GCCSI 2021; Wójcicki 2020].

Na **rysunku 5.3** przedstawiono typy struktur geologicznych wykorzystywanych do składowania dwutlenku węgla:

- głęboko występujące poziomy wodonośne solankowe;
- wyeksploatowane całkowicie lub częściowo złoża ropy naftowej i gazu ziemnego;
- głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla, zawierające metan.

Jedynie dwa pierwsze typy są istotne w przypadku oceny potencjału geologicznego składowania w Polsce. Poziomy wodonośne solankowe, a w mniejszym stopniu szcerpane złoża węglowodorów, charakteryzują się pojemnością zapewniającą możliwość składowania produktów emisji instalacji przemysłowych. Ponadto w przypadku częściowo szcerpanych złóż węglowodorów, w szczególności ropy naftowej, istnieje możliwość połączenia wspomaganiania wydobycia węglowodorów ze składowaniem dwutlenku węgla [Wójcicki i in. 2013].

Wyczerpujące i całościowe analizy potencjału składowania CO₂ dla obszaru Polski wykonano w ramach przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” (2008-2012) koordynowanego przez PIG–PIG i realizowanego dla Ministerstwa Środowiska ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej [Wójcicki i in. 2013]. Wykorzystano, zintegrowano i zweryfikowano wyniki dotychczasowych prac realizowanych w przedmiotowym zakresie ze środków publicznych, w tym wykonanych dla obszaru Polski w ramach projektu unijnego (7 Program Ramowy) EU Geocapacity [EU GeoCapacity 2008]. Na **rysunku 5.4** przedstawiono wybrane, najważniejsze wyniki projektu, tj. struktury wytypowane jako potencjalne składowiska dwutlenku węgla i inne obszary perspektywiczne. Na mapie zamieszczono także obszary chronione NATURA 2000, lokalizację największych emitentów dwutlenku węgla oraz lokalizację istniejących tras rurociągów. We wspomnianym raporcie oszacowano również dla Polski



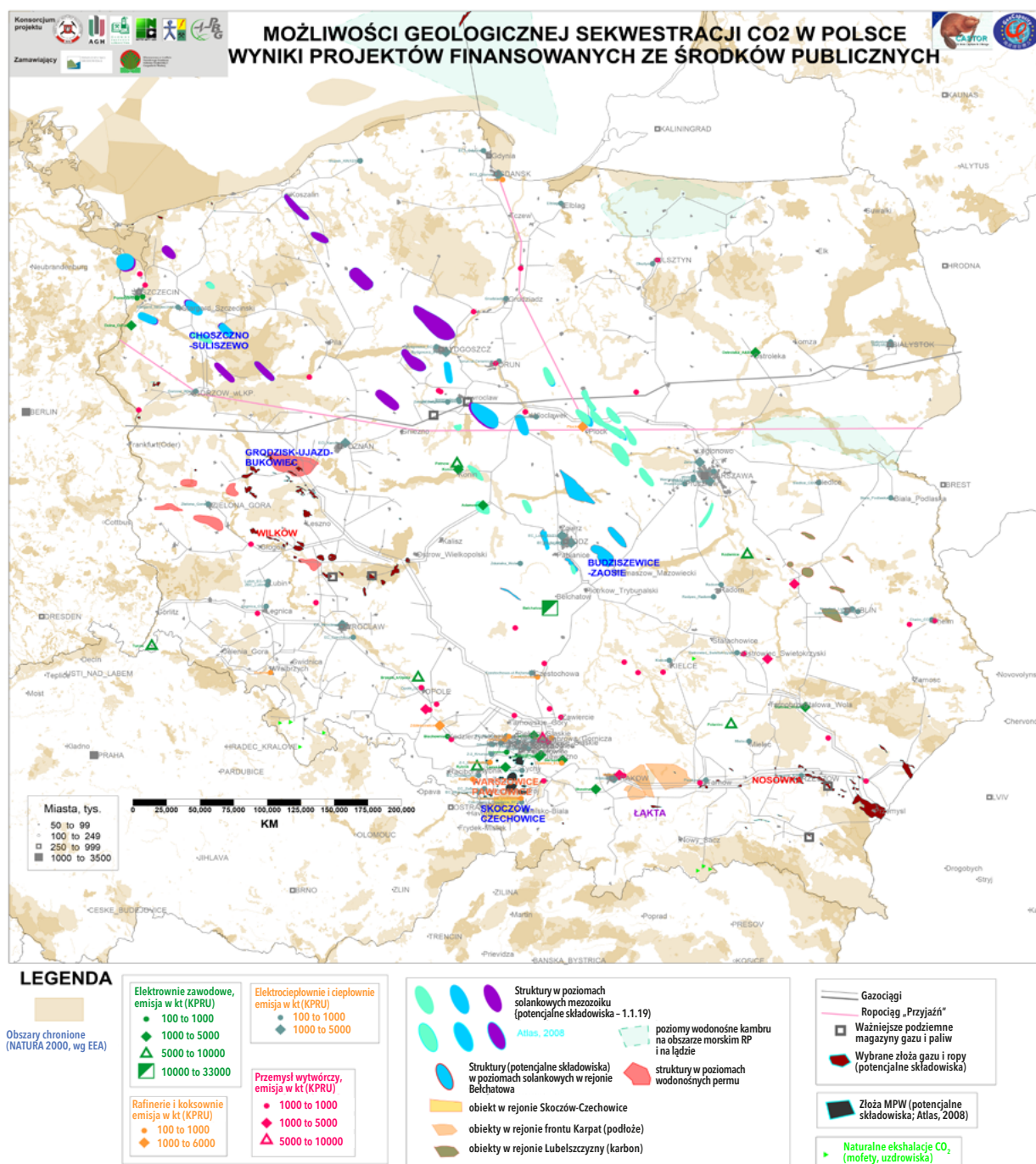
Źródło: [Wójcicki i in. 2013].

Rysunek 5.3. Schemat geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla

realistyczną (tzn. technicznie możliwą do wykorzystania) pojemność składowania CO₂, która wynosi 10-15 mld t. Oszacowano, że 90-93% tej pojemności przypadało na 46 wytypowanych struktur solankowych i 4 obszary perspektywiczne, 7-10% – na 39 wytypowanych złóż węglowodorów o znacznym stopniu szczerpania oraz mniej niż 1% – na 3 obiekty w pokładach węgla. Stwierdzono, że na obszar lądowy przypada ponad 90% oszacowanej pojemności. Przytoczona powyżej pojemność składowania dla Polski rzędu 10-15 mld t CO₂ odpowiadała okresowi około 50-75 lat ówczesnej (tzn. za rok 2012) emisji instalacji przemysłowych w Polsce objętych systemem ETS (0,2 mld t CO₂/rok).

Technologia CCS/CCUS, w tym podziemne geologiczne składowanie dwutlenku węgla, nie została dotąd wdrożona w Polsce na skalę przemysłową. Realizowany w latach 2009-2013 projekt demonstracyjny CCS PGE GiEK Bełchatów [PGE GiEK 2012] stanowił najpoważniejszą próbę realizacji takiego przedsięwzięcia w Polsce. Niestety, z uwagi na ryzyka finansowe, prawne problemy w zakresie akceptacji społecznej oraz opóźnienia w procedurach przetargowych dotyczących realizacji kolejnego etapu komponentu składowania, projekt ten został anulowany [PGE 2015]. Dotychczasowe praktyczne doświadczenia krajowe w zakresie podziemnego składowania CO₂ w strukturach geologicznych

obejmują w szczególności składowanie (zatłaczanie) gazu kwaśnego na bliskim szczytowania złożu gazu ziemnego Borzęcin. Zatłaczany gaz kwaśny jest odpadem powstającym z oczyszczania gazu ziemnego wydobywanego ze złoża. W trakcie oczyszczania uzyskuje się niepożądane składniki tzn. mieszaniny dwutlenku węgla i siarkowodoru. Zatłaczany gaz kwaśny zawiera ok. 80% CO₂ i ok. 20% H₂S oraz śladowe ilości węglowodorów. Dotychczas zatłoczono do złoża ponad 3,5 mln m³ tego gazu, co daje ok. 5,5 tys. t dwutlenku węgla [Lubaś i in. 2020].



Źródło: [Wójcicki i in. 2013].

Rysunek 5.4. Możliwości geologicznego składowania dwutlenku węgla w Polsce, w tym lokalizacja wytypowanych struktur geologicznych

W 2021 r. tematyka wdrożenia technologii CCS/CCUS w Polsce ponownie stała się przedmiotem zainteresowania rządu, przemysłu i jednostek badawczo-rozwojowych, zaś Minister Klimatu i Środowiska powołał Zespół do spraw rozwoju technologii wychwytu, składowania i wykorzystania CO₂ zrzeszający przedstawicieli wszystkich tych środowisk [Zarządzenie... 2021]. Ponadto procedowana jest nowelizacja prawa geologicznego i górniczego, zawierająca nowe zapisy dotyczące składowania dwutlenku węgla w ramach projektów na skalę przemysłową oraz prowadzenia wydobycia węglowodorów ze złóż w połączeniu ze składowaniem dwutlenku węgla [Projekt... 2021].

Dyskusja i podsumowanie

Z uwagi na aktualną sytuację geopolityczną oraz priorytety rządu i gospodarki narodowej w perspektywie krótko- i średnioterminowej problematyka rozbudowy infrastruktury magazynowania nośników energii, a także wdrożenia technologii CCS/CCUS/CCT nabiera szczególnego znaczenia. Wynika to z faktu, że aktualne są zarówno priorytety dla transformacji energetycznej w kierunku gospodarki niskoemisyjnej, jak również priorytety obejmujące optymalne wykorzystanie zasobów krajowych [PEP2040 2021; Polska... 2021; Założenia... 2022]. Konieczne są: dalszy rozwój OZE, poprawa efektywności energetycznej, dywersyfikacja dostaw węglowodorów i ich alternatyw, rozwój energetyki jądrowej, sieci i magazynowania energii (w tym wodoru jako nośnika energii). Optymalne wykorzystanie zasobów krajowych wiąże się z racjonalnym wykorzystaniem energetyki węglowej i zasobów węgla na potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego państwa.

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy realizował, koordynował lub uczestniczył w szeregu przedsięwzięć badawczych w zakresie podziemnego bezzbiornikowego magazynowania nośników energii w podziemnych strukturach geologicznych oraz geologicznego składowania i wykorzystania dwutlenku węgla. Działania te są również kontynuowane obecnie. Mają one w szczególności na celu dalsze rozpoznanie i lepsze udokumentowanie krajowego potencjału w tym zakresie.

Dotychczasowe przedsięwzięcia obejmowały w szczególności prace dotyczące magazynowania mediów w kawernach solnych w wysadach i pokładach soli na Niżu Polskim, realizowane we współpracy z partnerami badawczymi i przemysłowymi w ramach przedsięwzięć krajowych i międzynarodowych [Czapowski 2019; Tarkowski, Czapowski 2018; ESTMAP 2016]. W przypadku geologicznego składowania i wykorzystania dwutlenku węgla PIG–PIB koordynował przedsięwzięcie „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” [Wójcicki i in. 2013], poświęcone ocenie możliwości realizacji wybranych scenariuszy dla tej działalności na terenie Polski. Ponadto PIG–PIB uczestniczył w innych projektach krajowych i międzynarodowych dotyczących tej problematyki, współpracując z partnerami badawczymi i przemysłowymi.

Generalnie można stwierdzić, że zarówno w przypadku kawern solnych, jak i w głęboko występujących wodonośnych strukturach solankowych oraz w sczerpanych złóżach węglowodorów można magazynować lub składować różne substancje. Poszczególne struktury geologiczne występujące na obszarze Polski mogą być mniej lub bardziej odpowiednie dla podziemnego bezzbiornikowego

magazynowania gazu ziemnego, wodoru, wodoru + gazu ziemnego, sprężonego powietrza czy też geologicznego składowania i wykorzystania dwutlenku węgla. Kawerny wyługowane w wybranych do tego celu pokładach soli i w wysadach solnych mogą służyć – jak dowodzi praktyka wielu dziesięcioleci – do efektywnego i elastycznego podziemnego magazynowania gazu ziemnego, a także – co jeszcze nie jest stosowane w Polsce – wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego oraz sprężonego powietrza. Wodór stanowi interesujący przypadek, gdyż z uwagi na jego niski ciężar właściwy, w standardowej kawernie można pomieścić 10-krotnie więcej wodoru niż gazu wysokometanowego [Letcher 2020]. Szczerpane złoża gazu ziemnego mogą służyć do magazynowania gazu ziemnego, wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego oraz sprężonego powietrza, a także do geologicznego składowania dwutlenku węgla. Częściowo szczerpane złoża ropy naftowej mogą być wykorzystane do składowania dwutlenku węgla połączonego z ich dalszą eksploatacją (CO₂-EOR), zaś całkowicie szczerpane złoża – także do magazynowania. Wodonośne struktury solankowe, charakteryzujące się największą pojemnością spośród wymienionych typów struktur geologicznych, mogą służyć do składowania dwutlenku węgla, jak również magazynowania wymienionych nośników energii [Letcher 2020].

Literatura:

- Brańka S. 2008. Analiza potrzeb magazynowych gazu ziemnego w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 34, zeszyt 3/2 (Przegląd Solny), 25-38.
- Cornot-Gandolphe S. 2018. *Underground Gas Storage in the World – 2018 Status*. Cedigaz.
- Czapowski G. 2019. Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyn) w Polsce – ocena geologiczna. *Biuletyn PIG*, vol. 477, 21-54.
- ESTMAP 2016. <https://estmap.eu/home.html> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- EU GeoCapacity 2008. <http://www.geology.cz/geocapacity> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Gas Storage Poland 2022. <https://ipi.gasstoragepoland.pl> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Gąska K., Hoszowski A., Gmiński Z., Kurek A. 2012. Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. 1-304. *Stow. Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego*, Oddział Warszawa II. Warszawa.
- GCCSI 2021. *Global Status of CCS 2021, CCS Accelerating to Net Zero*, <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- IPCC 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, 2005.
- Jasiński Z. 2004. Podziemny system magazynowania paliw w kawernach solnych. *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 3-4, 62-69.
- Lake L.W., Walsh M.P. 2008. *Enhanced Oil Recovery (EOR) Field Data Literature Search*. Technical Report for Danish North Sea Partner, Danish Energy Agency, Mærsk Olie og Gas AS.
- Letcher T. (red.) 2020. *Future Energy Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*. 3rd Edition – January 16, 2020. Elsevier.
- Lubaś J., Szott W., Łętkowski P., Gołąbek A., Miłek K., Warnecki M., Wojnicki M., Kuśmierczyk J., Szuflińska S. 2020. Long-term sequestration process in the Borzęcin structure – observation evidence of the injected acid gas migration and possible leakage. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, nr 230, Kraków.

- Maciejewski A. 2008. Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 34, zeszyt 3/2 (Przegląd Solny), 39-53.
- PGE GiEK 2012. Instalacja demonstracyjna CCS <https://pgegiiek.pl/Ochrona-srodowiska/CCS/Instalacja-demonstracyjna-CCS> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- PGE 2015. The Bełchatów CCS Project. BASRECCS 3rd Conference on CCS, Warsaw, 29.05.2015.
- PEP2040 2021. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. (Monitor Polski – rok 2021 poz. 264).
- Piesik-Buś W., Zamojcin J. 2015. Analiza przydatności wybranych złóż niecki zielonogórskiej do konwersji na PMG. *Nafta-Gaz*, vol. 71, s. 185-189.
- Polska Strategia Wodorowa 2021. Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Uchwała nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (Monitor Polski – rok 2021 poz. 1138).
- PGNiG 2022 <https://pgnig.pl/podziemne-magazyny-gazu> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Projekt ustawy o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw, Minister Klimatu i Środowiska, 25.10.2021 r., <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12352656/katalog/12824018#12824018> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Tarkowski r., Czapowski G. 2018. Salt domes in Poland – Potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 46, 21414-21427.
- Wójcicki A., Nagy S., Lubaś J., Chećko J., Tarkowski r. 2013. Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. PIG-PIB, Warszawa, <https://skladowanie.pgi.gov.pl> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Wójcicki A. (red.) 2020. Zadanie KAPS CO₂: monitorowanie statusu projektów CCS. PIG, Warszawa, <http://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/KAPS/WebHome/sprawozd2020p.pdf> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Zacharski J., Wójcicki A., Czapowski G. 2021. Wykorzystanie wybranych struktur geologicznych do podziemnego magazynowania substancji. XI Forum Innowacyjności „Klimat wobec wyzwań XXI wieku”, 18 listopada 2021 r., Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Założenia do aktualizacji Polityki Energetycznej Polski do 2040 r. (PEP2040) – wzmocnienie bezpieczeństwa i niezależności energetycznej (KPRM 29.03.2022 r.), <https://www.gov.pl/web/premier/zalozenia-do-aktualizacji-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r-pep2040--wzmocnienie-bezpieczenstwa-i-niezaleznosci-energetycznej> (dostęp w dn.: 05.04.2022).
- Zarządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 25 sierpnia 2021 r. w sprawie powołania Zespołu do spraw rozwoju technologii wychwytu, składowania i wykorzystania CO₂ (Dziennik Urzędowy Ministra Klimatu i Środowiska – rok 2021 poz. 71).
- Zivar D., Kumar S., Foroozesh J. 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 45, 23436-23462.

Rozdział 6

Ograniczanie emisji do środowiska naturalnego czynników szkodliwych pochodzących z jednostek eksploatowanych na polskich obszarach morskich

dr inż. Piotr Treichel

dr hab. inż. kpt. ż.w. Wojciech Ślęczka, prof. PM

dr hab. inż. Jaromir Mysłowski

dr inż. Jan Drzewieniecki

Politechnika Morska w Szczecinie

Wstęp

Omawianie zagadnień związanych z emisją czynników szkodliwych do środowiska naturalnego ze statków i morskich obiektów technicznych warto rozpocząć od ustalenia zakresu znaczeniowego pojęcia emisji. Według definicji podanej w Słowniku Języka Polskiego PWN [2022] emisja oznacza wypuszczanie do atmosfery pyłów lub gazów oraz wysyłanie przez ciała energii w postaci światła, dźwięku i elektronów. W Ustawie Prawo ochrony środowiska dodatkowo podkreślono fakt, że emisja odbywa się bezpośrednio lub pośrednio w wyniku działalności człowieka i polega na wprowadzeniu do powietrza, wody, gleby i ziemi substancji lub energii w postaci energii cieplnej, hałasu, wibracji lub pola elektromagnetycznego [Ustawa... 2021]. Przepisy Konwencji MARPOL, dotyczące statków morskich, emisję definiują natomiast jako każde wydalenie ze statków do atmosfery lub do morza substancji zubażających warstwę ozonową, tj. tlenków azotu i tlenków siarki, cząstek stałych oraz lotnych związków organicznych [MARPOL, Zał. VI, Prawidło 2, 2015].

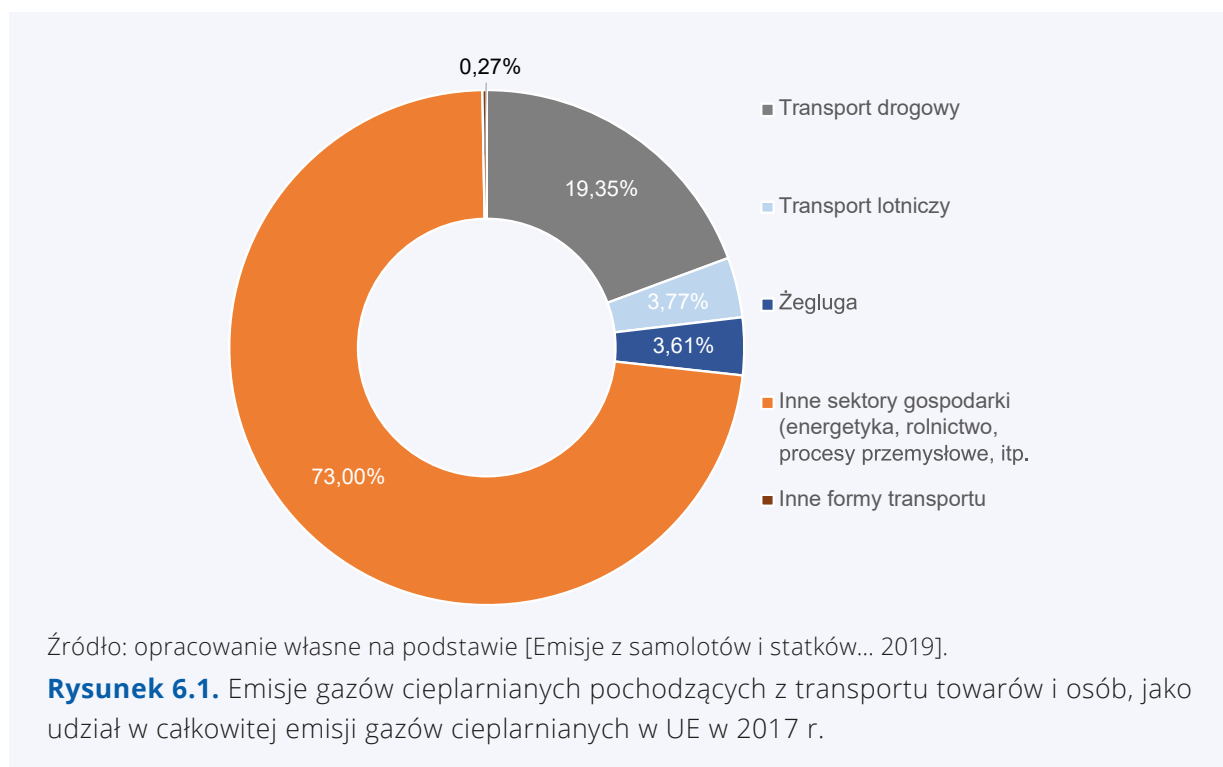
Przebieg eksploatacji niemal wszystkich jednostek pływających wiąże się z emisją do środowiska czynników szkodliwych. Wyposażenie statków w maszyny energetyczne, realizacja zadań

przeładunkowych czy pobyt osób na statku wiąże się z emisją lub usuwaniem do środowiska substancji i energii. Biorąc pod uwagę częstość występowania czynników szkodliwych powstających w powiązaniu z transportem towarów i osób oraz ich oddziaływanie na otoczenie, należy przyjąć, że największy wpływ na zmiany zachodzące w klimacie mają emisje substancji do atmosfery oraz energii cieplnej do środowiska.

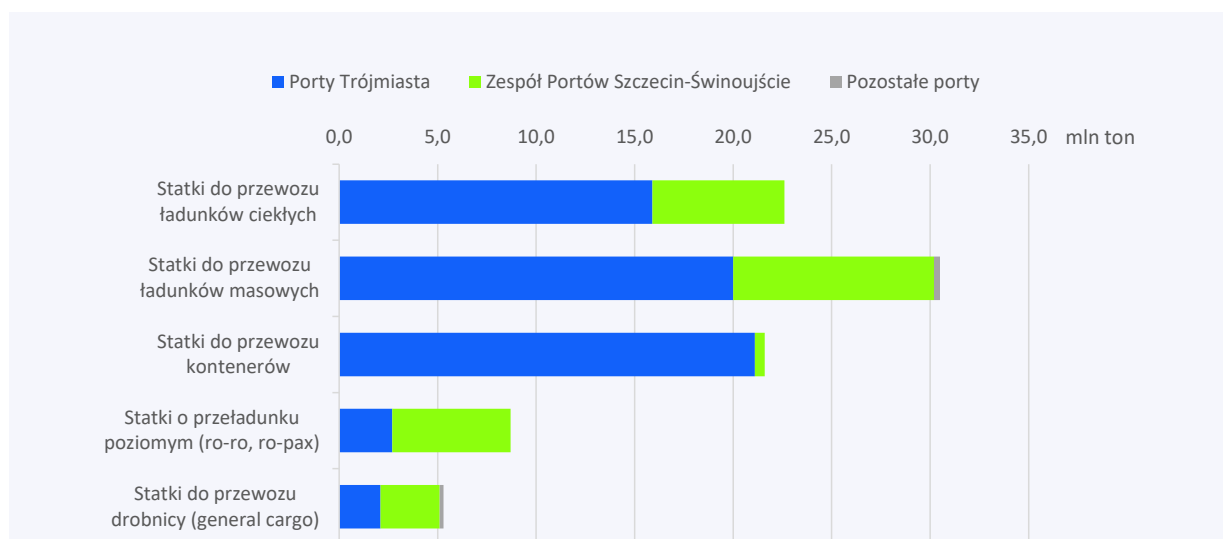
Emisja do środowiska niepożądanego energii w postaci światła, dźwięku (hałasu) czy wibracji oraz pól elektromagnetycznych lub elektronów istotna z punktu widzenia oceny całościowego oddziaływania obiektów wpływających na środowisko zostanie w toku dalszej analizy jedynie zasygnalizowana.

Znaczenie transportu śródlądowego i morskiego w ograniczaniu emisji

Analizując jednostki pływające pod kątem ilości emitowanych do środowiska naturalnego substancji i energii, warto dokonać porównania z równoważnymi środkami lądowymi. Na **rysunku 6.1** przedstawiono udział emisji gazów cieplarnianych pochodzących z poszczególnych rodzajów środków transportu, w tym z lotnictwa i żegluga, jako udział w całkowitej emisji gazów cieplarnianych w UE. Środki transportu powietrznego w dalszej analizie zostaną pominięte z uwagi na odmienność transportowanych grup towarów, jak również potencjalnej ich ilości. Dla prostoty przyjęto porównanie bazujące na transporcie towarów drogą morską z wykorzystaniem kontenerów, który możliwy jest zarówno z wykorzystaniem lądowych środków transportu, jak i z wykorzystaniem transportu morskiego i rzeczno-



W 2020 r. do polskich portów zawinęło 17,65 tys. statków, z czego ok. 78% z ładunkiem. Porty te przeładowały ponad 88,5 mln t ładunków oraz trafiły do nich kontenery w ilości równoważnej ok. 2,6 mln TEU [GUS Transport wyniki... 2021]. Dla porównania transportem kolejowym w 2020 r. wyeksportowano prawie 24,5 mln t ładunków (przez porty morskie 7,5 mln t) oraz zaimportowano prawie 42 mln t (przez porty morskie ponad 11 mln t), natomiast transportem drogowym wyeksportowano około 87 mln t a zaimportowano ok. 74 mln t. W powyższej ocenie nie ujęto jednak dużej branży, która w najbliższym czasie będzie znacznym udziałowcem emisji na polskich obszarach morskich, wiążącej się z powstającymi morskimi farmami wiatrowymi i ich obsługą. Na **rysunku 6.2** przedstawiono obroty ładunkowe w wybranych polskich portach morskich i kategoriach ładunkowych w 2020 r. Ładunki masowe suche stanowiły około 34% ogółu przeładunków, ładunki masowe ciekłe stanowiły 25,4% ogółu ładunków, a ładunki w kontenerach dużych – 24,5% [GUS Gospodarka morska... 2021]. Na podstawie powyższego zestawienia można stwierdzić, że transport kontenerowy stanowi wysoki procent w obrocie ładunków. Statki morskie przewożące kontenery mogą zabierać także niewielkie ich ilości – np. 200-300 standardowych kontenerów 20-stopowych (TEU¹) w przypadku jednostek typu General Cargo, dostarczając kontenery do bardzo małych portów. Natomiast statki wyspecjalizowane jedynie do przewozu kontenerów mogą przewozić ilości sięgające 22-23 tys. TEU, przy czym w ich przypadku przewóz ogranicza się do największych portów – tzw. hubów, z których to kontenery rozwożone są dalej przez mniejsze jednostki pływające lub z wykorzystaniem transportu lądowego.



Źródło: opracowanie własne na podstawie [GUS Gospodarka morska... 2021].

Rysunek 6.2. Obroty ładunkowe według portów i kategorii ładunkowych w 2020 r.

Dla porównania emisji pochodzącej z transportu morskiego i lądowego zestawmy statek średniej wielkości, tj. o pojemności 4,5 tys. TEU z odpowiadającą zdolnościami przewozowymi flotą samochodów ciężarowych, z których każdy może przewozić kontener 40-stopowy lub dwa kontenery 20-stopowe. Przyjmując, że przewóz odbywa się z portu w Gdańsku do portu w Rotterdamie drogą morską,

¹ TEU – jednostka pojemności statku odpowiadająca standardowemu kontenerowi o długości 20 stóp.

statek ma do pokonania ok. 1606 km (867 mil), co przy prędkości 24 węzłów daje czas pokonania dystansu wynoszący ok. 36 h (dla uproszczenia nie uwzględniono czasu rozpędzania i hamowania statku oraz czasu niezbędnego na manewry). Statek zużyje w tym czasie na potrzeby napędu, wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, dla zapewnienia warunków bytowych załodze oraz na cele funkcjonowania urządzeń łącznie ok. 305,5 tys. kg paliwa. Przyjmując zgodnie z wytycznymi IMO wskaźnik emisji CO₂ dla paliw pozostałościowych wynoszący 3,114 kg CO₂ / kg paliwa, można założyć, że w trakcie całej podróży statek wyemituje 951,4 tys. kg CO₂ [Rezolucja MEPC.308(73) 2018]. Dodatkowo wraz z wodą chłodzącą oraz ze spalinami zostanie odprowadzone do morza i do atmosfery 6,18 Tj energii odpadowej. Na skutek spalania paliw w silnikach okrętowych można spodziewać się emisji do atmosfery nie więcej niż maksymalnie dozwolonych na podstawie przepisów ochrony środowiska 23,6 tys. kg tlenków azotu (NO_x) [MARPOL, Zał. VI, Prawidło 13, 2015] oraz 763,8 kg tlenków siarki (SO_x) [MARPOL, Zał. VI, Prawidło 14, 2015].

Przewóz drogą lądową tej samej liczby kontenerów zaangażowałby flotę ok. 2,3 tys. samochodów ciężarowych z naczepami, których łączna długość uwzględniająca niezbędne odległości pomiędzy kolejnymi pojazdami wynosiłaby co najmniej 141,45 km, co przy łącznej długości trasy wynoszącej ok. 1280 km stanowiłoby ponad 11% jej długości. Czas przejazdu każdego z samochodów ciężarowych, wliczając wymagane prawem okresy odpoczynku kierowcy, wyniosłby średnio ok. 18 h przy zapotrzebowaniu łącznie 875,84 tys. kg paliwa [40ton.net 2016]. W efekcie wyemitowano by do atmosfery ok. 2,81 mln. kg CO₂ oraz 20,5 Tj ciepła odpadowego. Dodatkowo maksymalne dozwolone ilości wyemitowanych z samochodów tlenków azotu (NO_x) i tlenków siarki (SO_x) wyniosłoby odpowiednio 4,7 tys. kg oraz 2,2 tys. kg.

Przewozowi przyjętej powyżej liczby kontenerów drogami publicznymi i autostradami towarzyszy zauważalnie niższa emisja NO_x. Spadek emisji w porównaniu z emisją towarzyszącą przewozowi drogą morską dochodzi do 80%. Wynika to m.in. z wprowadzanych począwszy od 2006 r. na obszarze Unii Europejskiej regulacji prawnych. Niestety równocześnie prawie trzykrotnie zwiększa się emisja CO₂ oraz SO_x do atmosfery, a ponad trzykrotnie emisję ciepła odpadowego.

Widać zatem bardzo wyraźnie, że transport morski jest niskoemisyjną alternatywą dla lądowych środków transportu, jednak niezależnie od zadań przypisanych do poszczególnych jednostek pływających zwiększająca się ich liczba w obrębie polskich obszarów morskich wymaga wdrożenia dodatkowych metod obniżania emisji w najszerszym tego słowa znaczeniu. W sukurs temu idą działania Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO), Komisji Helsińskiej (HELCOM) oraz Parlamentu Europejskiego i Rady Europy, które począwszy od lat 90. XX w. dążą do uregulowania emisji szkodliwych dla środowiska czynników, takich jak NO_x, SO_x, zanieczyszczenia stałe (PM), substancje zubażające warstwę ozonową (halony, freony) oraz lotne związki organiczne (VOCs), przyczyniając się do ograniczenia emisji szkodliwych czynników oraz poprawy atrakcyjności transportu drogą morską.

Okrętowe źródła emisji

Oddziaływanie statku na środowisko odbywa się na bardzo wielu płaszczyznach. Z jednej strony emitowane są substancje szkodliwe powstające w związku z pracą okrętowych urządzeń energetycznych, z drugiej przetwarzanie na statku energii wymaga wcześniejszych procesów przygotowawczych, które nie są obojętne dla otaczającego środowiska i wiążą się również z powstawaniem odpadów oraz emisją energii. Ponadto środki zapewniające bezpieczeństwo (np. środki przeciwpożarowe), wykorzystywane na statkach urządzenia radarowe i środki łączności, skutkują dodatkową emisją do środowiska substancji lub energii. Nakładają się na to wszelkie procedury związane z przewożeniem ładunku czy zapewnieniem stateczności jednostce pływającej, które wprowadzają dodatkowe ryzyka zanieczyszczeń. Analizując poszczególne czynności wykonywane przez załogę statku podczas jego eksploatacji (**tabela 6.1**), można zauważyć, że nawet pozornie błahe działania mogą nieść ze sobą ryzyko wytwarzania szerokiego spektrum odpadów. W **tabeli 6.1** w celu poprawy jej czytelności pominięto aspekt wytwarzania i emisji energii.

Tabela 6.1. Wybrane czynności i procedury związane z eksploatacją statku oraz powstające w ich efekcie rodzaje zanieczyszczeń

Źródło zanieczyszczeń	Emisja do atmosfery	Wody odpadowe	Szlamy	Opady olejowe	Szmaty zaolejone	Sadze	Popioły	Odpady ładunkowe	Zmiotki i odpryski farb	Tworzywa sztuczne	Odpady żywności	Inne
Dział maszynowy												
Eksploatacja silników i urządzeń energetycznych	+	+	·	+	+	+	·	·	·	·	·	+
Przygotowanie paliw	·	+	+	+	·	·	·	·	·	·	·	·
Oczyszczanie olejów smarowych	·	+	+	+	·	·	·	·	·	·	·	·
Produkcja wody słodkiej	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Naprawa i konserwacja mechanizmów siłowni	·	+	+	+	+	+	·	·	+	+	·	+
Użytkowanie instalacji chłodni i klimatyzacji	+	·	·	+	+	·	·	·	·	+	·	+
Użycie stałej instalacji gaszenia siłowni	+	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Przeglądy i czyszczenie zbiorników paliwowych, olejowych, itp.	·	+	+	+	+	·	·	·	·	·	·	·
Czyszczenie, osuszanie i konserwacja instalacji ładunkowych	·	+	+	+	+	·	·	+	·	+	·	+
Utylizacja odpadów	·	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·

Źródło zanieczyszczeń	Emisja do atmosfery	Wody odpadowe	Szlamy	Opady olejowe	Szmaty zaolejone	Sadze	Popioły	Odpady ładunkowe	Zmiotki i odpryski farb	Tworzywa sztuczne	Odpady żywności	Inne
Dział hotelowy												
Przygotowanie i wydawanie posiłków	+	+	+
Czyszczenie i konserwacja pomieszczeń bytowych	.	+	+	+	.	+
Dział pokładowy												
Przewóz ładunku i czyszczenie ładowni	+	+	+	+	.	.	.	+	.	+	.	.
Pozostałości ładunkowe	+
Odpady sztauerskie	+	.	.
Konserwacja kadłuba	+	+	+	.	+
Czyszczenie zbiorników balastowych	.	+	+

Źródło: opracowanie własne.

Napęd jednostek morskich ewoluował od tłokowego silnika parowego, przez turbinę parową, silnik spalinowy tłokowy z zapłonem samoczynnym, by ostatecznie w połowie XX w. zapoczątkować wykorzystywanie na statkach turbin gazowych². W ostatnich latach pojawia się coraz więcej informacji o zastosowaniu na statkach rozwiązań hybrydowych spalinowo-elektrycznych z możliwością magazynowania wytworzonej energii. Rośnie wykorzystanie paliw gazowych do zasilania silników z zapłonem iskrowym (Pure Gas) lub silników dwupaliwowych (Dual Fuel – DF). Pojawiają się także pierwsze statki, w których do zasilania silników wykorzystuje się metanol lub paliwo wodorowe – tu jednak jest mowa o prototypach lub małych jednostkach. Napędy statków z wykorzystaniem turbin parowych i gazowych stosowane są na niewielkiej liczbie wyspecjalizowanych statków (odpowiednio na zbiornikowcach do przewozu ropy naftowej lub skroplonego gazu oraz na jednostkach szybkich – HSC). Napęd silnikami gazowymi z zapłonem iskrowym czy silnikami dwupaliwowymi z zapłonem samoczynnym stanowi jeszcze rzadkość. Szacuje się, że obecnie napęd ten wykorzystuje ok 2% statków konwencyjnych, co wraz z jednostkami typu LNG-ready daje według różnych szacunków od 200 do 300 jednostek [Ship, Bunker 2017, Sea-LNG 2022]. Znaczącą większość stanowi zatem napęd wykorzystujący w różnych konfiguracjach silnik spalinowy z zapłonem samoczynnym zasilany paliwami ciekłymi ropopochodnymi [Witkowski 2016].

² Konwencja SOLAS istotnie ogranicza stosowanie na statkach silników z zapłonem iskrowym z uwagi na bezpieczeństwo przeciwpożarowe.

Silniki z zapłonem samoczynnym charakteryzuje emisja spalin unoszących oprócz niespalonych węglowodorów, cząstek stałych, różnego rodzaju produktów spalania również znaczne straty energii cieplnej unoszonej wraz ze spalinami, pochodzącej ze spalania dostarczonego do nich paliwa. Zarówno ze względów wytrzymałościowych, jak i zapewnienia możliwości smarowania współpracujących z sobą części, podzespoły wchodzące w skład komory spalania muszą mieć zapewnione chłodzenie (dotyczy to tulei cylindrowej, głowicy, zaworów wtryskowych, jak również tłoków). Ciepło odprowadzamy ponadto ze wszystkich par współpracujących ze sobą części oraz przy okazji poprawy wskaźnika objętościowego mocy silnika w drodze jego doładowania (powiększenia mocy silnika przy niezminionej objętości skokowej, liczbie pracujących cylindrów oraz prędkości obrotowej). Moc znamionowa dwusuwowego silnika napędu głównego może osiągać od kilkuset kW do ponad 81 MW.

Silnik taki, gdy proces roboczy nie jest zoptymalizowany pod względem emisji, zużywa od około 0,170 do 0,180 kg/kWh (silniki średnioobrotowe – od 0,190 do 0,210 kg/kWh) okrętowego paliwa pozostałościowego, emitując ponad 0,03 kg/kWh związków szkodliwych [Witkowski 2016]. Optymalizacja pozwala na obniżenie wartości jednostkowego zużycia paliwa nawet poniżej 0,155 kg/kWh [Winterthur... 2022].

Kolejnym typem urządzenia energetycznego emitującego znaczne ilości substancji i energii do otoczenia są okrętowe pomocnicze kotły opalane. Wymienić tu można również spalarki okrętowe, choć z tą różnicą, że podstawowym zadaniem kotłów jest wytworzenie energii na cele grzewcze i procesowe, natomiast głównym celem spalarek jest utylizacja odpadów. Choć kotły opalane mają znikomy wpływ na emisję pochodzącą z jednostek pływających podczas ich podróży morskiej – wykorzystuje się wówczas najczęściej szereg urządzeń poprawiających globalną efektywność energetyczną maszynowni, w tym kotły utylizacyjne odzyskujące część energii odpadowej pochodzącej ze spalin silnika napędowego, jednak nie można ich pominąć w analizie.

Poza emisją związaną z eksploatacją urządzeń energetycznych, do środowiska emitowane są również ze statków lotne związki organiczne (VOC), które, mając niską temperaturę wrzenia, przedostają się ze zbiorników i ładowni do atmosfery. Zaliczamy do nich m.in. takie proste węglowodory jak propan, butan, ale również alkohole, formaldehydy, naftaleny, acetony i wiele innych [United... 2000]. Związki te można spotkać również w pestycydach, rozpuszczalnikach oraz środkach zmniejszających palność innych materiałów.

Kolejną grupę zanieczyszczeń środowiska emitowanych ze statków stanowią środki przeciwpożarowe. O ile w przypadku gaśnic przenośnych wielkość emisji nie musi stanowić istotnego zagrożenia dla środowiska, o tyle w przypadku stałych instalacji mogą być emitowane znaczne ilości czynników gaśniczych. Ogólny zakaz stosowania halonów na statkach [Kołwzan 2006] spowodował, że czynnik ten występuje jedynie tam, gdzie jego czystość i skuteczność w porównaniu z pozostałymi czynnikami gaśniczymi staje się krytyczna. Jednak również w tym przypadku wskazano czynniki, których wykorzystanie może być warunkowo dopuszczone, określono datę graniczną dla nowopowstałych instalacji oraz wskazano datę końcową ich wykorzystania [Rozporządzenie Parlamentu... 2009]. Odmianą sytuację mamy z instalacjami wykorzystującymi dwutlenek węgla dla celów gaśniczych. Gaz ten stosuje się wszędzie tam,

gdzie nie można zagwarantować szczelności pomieszczenia podczas prowadzenia akcji gaśniczej [PRD 2022]. Na typowym statku pełnomorskim występują stałe instalacje gaszenia siłowni, lokalna instalacja gaszenia kolektora wylotowego spalin silników napędowych, lokalna instalacja gaszenia kotła opalane-go. Mogą występować także instalacje lokalne w spawalni, magazynie farb, itp. Projektowo zakłada się konieczność wypełnienia czynnikiem gaśniczym od 36% do 40% objętości bronionego pomieszczenia. W efekcie dla dużych siłowni ilość niezbędnego do tego celu czynnika gaśniczego może wymagać zainstalowania od kilkudziesięciu do ponad stu butli CO₂, dając łączną ilość dwutlenku węgla wyrzuconego w trakcie pojedynczej akcji gaśniczej dochodzącą do 7 tys. kg. Z tego też powodu oraz z uwagi na fakt, że obecność CO₂ w pomieszczeniu ma krytyczny wpływ na zdrowie i życie ludzi (zwłaszcza przy stężeniach przekraczających 2-3%, gdy pojawiają się już zaburzenia oddychania), w stałych instalacjach gaśniczych zaczęto stosować czynniki takie jak Inergen, Novec1230 czy też FM200, wymagające jednak bezwzględnie uszczelnienia siłowni przed rozpoczęciem akcji gaśniczej.

Statki emitują do otoczenia również hałas, który może rozchodzić się zarówno w powietrzu, jak i w środowisku wodnym, przy czym w środowisku wodnym fale akustyczne rozchodzą się z prawie 4,5 razy większą prędkością i przy mniejszym tłumieniu niż w powietrzu. Hałas generowany jest przy okazji wszystkich czynności wykonywanych na pokładzie w związku z przeładunkiem czy pracami remontowo-konserwacyjnymi. Cechuje się on wówczas najczęściej znaczną intensywnością, jednak ma krótkotrwały charakter. Znacznie większą uciążliwością wykazuje się hałas generowany przez urządzenia elektryczne, hydrauliczne i przepływowe, w których emisja hałasu odbywa się przez bardzo długi czas (bywa, że przez cały okres eksploatacji urządzenia lub statku). Hałas ten może być przyczyną narastającego zmęczenia organizmu prowadzącego do zmęczenia przewlekłego mogącego skutkować u ludzi chorobami psychosomatycznymi.

Statek emituje także promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące z różnego rodzaju maszyn i aparatów elektro-energetycznych, torów kablowych linii zasilających czy urządzeń emitujących wiązki elektromagnetyczne, takich jak radary, głębokościomierze czy radarowe lub mikrofalowe mierniki poziomu cieczy w zbiornikach.

Metody ograniczania emisji i kierunki rozwoju statków niskoemisyjnych i zeroemisyjnych

Choć dążenie do żeglugi charakteryzującej się zerową emisją jest w obecnym przypadku dla większości środków transportu technologicznie niewykonalne, to mimo wszystko należy dążyć do promowania i wdrażania takich technologii i rozwiązań, które na zasadzie kolejnych przybliżeń pozwolą na znaczącą redukcję ogółu czynników emitowanych do środowiska w związku z realizacją zadań na wodach morskich. W dalszej części rozdziału omówione zostaną sposoby ograniczenia emisji pochodzących z okrętowych urządzeń energetycznych przedostających się do środowiska głównie pod postacią substancji emitowanych wraz ze spalinami, jak również emisji energii odpadowej. Przyjęte zostanie również założenie posiadania przez czytelnika wiedzy na temat wymagań obowiązujących w obszarach kontroli emisji.

Najprostszą, dostępną powszechnie metodą ograniczenia emisji czynników szkodliwych do środowiska, w tym ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin oraz energii odpadowej, jest redukcja prędkości z jaką poruszają się statki. Co prawda ciężko jest obecnie oszacować optymalne pod względem emisji prędkości żeglugi, gdyż certyfikaty EIAPP wydawane w związku z dopuszczeniem silnika okrętowego do eksploatacji, zawierające m.in. dane dotyczące emisji z okrętowych silników spalinowych, mają podaną tylko średnią ważoną wielkości emisji, jednak zawierają one również wskazanie cyklu pomiarowego jakiemu silnik był poddany podczas prób. Można zatem rozważyć wykorzystanie wszystkich punktów pomiarowych z prowadzonych podczas certyfikacji testów przy różnych obciążeniach silnika i/lub prędkościach obrotowych by ułatwić dobór prędkości statku z uwzględnieniem optymalizacji emisji.

Kolejną stosowaną obecnie metodą ograniczenia emisji związków szkodliwych ze statków jest stosowanie dodatkowych, montowanych na nowobudowanych lub modernizowanych statkach instalacji ograniczających emisję wybranych składników spalin. Zaliczyć można do nich instalacje służące do ograniczenia emisji tlenków azotu poprzez ich redukcję do wolnego azotu i pary wodnej w obecności katalizatora oraz przy wykorzystaniu roztworu mocznika lub amoniaku (Selective Catalytic Reduction – SCR), w drodze zmniejszenia zawartości tlenu w ładunku doprowadzanym do komór spalania poprzez recyrkulację spalin (Exhaust Gas Recirculation – EGR przy 30-40% recyrkulacji oraz Eco-EGR przy 10-15% recyrkulacji) oraz w drodze ograniczenia przyrostu temperatur podczas przebiegu procesu spalania w oparciu o spalanie emulsji paliwowo-wodnych, nawilżanie powietrza doładowującego lub bezpośredni wtrysk wody do komory spalania [ABS... 2020]. Natomiast ograniczenie emisji tlenków siarki możliwe jest jedynie przed lub za silnikiem. O ile w przypadku tlenków azotu warunki przebiegu procesu spalania i wymiany ładunku mają ogromny wpływ na ich tworzenie się (poprzez wpływ na przebieg temperatury i ciśnienia w komorze spalania), o tyle w przypadku tlenków siarki można sparafrazować znane powiedzenie: „siarka na wejściu – siarka na wyjściu”. Jedyną więc nieingerującą w zawartość siarki w spalinach metodą ograniczenia emisji tlenków siarki w paliwach jest zastosowanie skruberów, które przy okazji mogą oczyszczać spaliny z cząstek stałych (Exhaust Gas Cleaning Systems – EGCS). Skuteczność funkcjonowania systemów EGCS zależy w dużej mierze od przyjętej metody oczyszczania. Początkowo stosowano głównie urządzenia typu „open-loop” będące właściwie jedynie płuczками spalin i neutralizujące kwaśne produkty spalania na drodze wypłukiwania ich ze spalin wodą morską. Obecnie coraz większy nacisk kładzie się na ograniczanie emisji substancji szkodliwych zarówno do atmosfery, jak i poprzez odpływy z wodą płuczącą. W efekcie wcześniejsze rozwiązania wypierane są przez rozwiązania typu „closed-loop”, gdzie kwaśne produkty spalania neutralizuje się w obiegu zamkniętym z wykorzystaniem dodatków alkalicznych do wody przepływającej spaliny. Niestety rozwiązanie to wciąż zakłada odprowadzenie ciepła odpadowego do wody zaburtowej. Funkcjonowanie tych systemów jest dosyć złożone, w zależności od konfiguracji mają różne wymagania. Rozróżniamy np. wysoko- i niskociśnieniowe instalacje SCR różniące się m.in. temperaturą pracy. Dodatkowo wymagania dotyczące postępowania z wodami odpadowymi z systemów EGR zmieniają się znacząco w przypadku stosowania paliw o różnej zawartości siarki. Nie bez znaczenia jest też fakt, że skuteczność ograniczania emisji NO_x zależy od zastosowanej metody i wynosi od ok. 20% dla rozwiązania wykorzystującego emulsje paliwowo-wodne do ok. 95% dla instalacji SCR [ABS... 2020].

Kolejną rozwijaną od przełomu wieków metodą ograniczenia emisji szkodliwych czynników ze statków jest zastosowanie paliw gazowych, w tym LNG (Liquefied Natural Gas), CNG (Compressed Natural Gas) czy LPG (Liquefied Petroleum Gas). Stosuje się wiele rozwiązań, począwszy od silników z zapłonem iskrowym, dla których paliwa gazowe są wyłącznym rodzajem paliw zasilających silniki, skończywszy na silnikach dwupaliwowych przystosowanych do spalania zarówno żeglugowego oleju napędowego, jak i paliwa gazowego. Początkowo zastosowanie takiego rozwiązania było ograniczone do gazowców, a podyktowane było koniecznością racjonalnego wykorzystania dużej ilości gazu odparowującego z przewożonego w zbiornikach ładunku, który w postaci tzw. „boill-off gas” (BOG) mógł doprowadzić do nadmiernego wzrostu ciśnienia w zbiorniku. Obecnie praktycznie każdy rodzaj statku ma opracowania koncepcyjne lub rozwiązania prototypowe dotyczące sposobu przechowywania i dostarczania paliw gazowych dla potrzeb napędowych. Dla gazowca przeznaczony do przewozu LNG o pojemności ładunkowej 100 tys. m³ intensywność odparowania wynosi średnio około 138 tys. kg gazu na dobę, co wystarcza do zasilania silnika napędowego o mocy 35 tys. kW [Włodarski, Witkowski 2006].

Tendencje rozwojowe zapoczątkowane przez zasilane paliwami gazowymi opartymi na prostych węglowodorach silniki DF kontynuowane są obecnie w kilku różnych kierunkach. Ujawnione w trakcie rozwoju silników zasilanych LNG zjawisko wycieku metanu (Methane Slip) polegające na przedostawaniu się niespalonego metanu wraz ze spalinami do atmosfery, pojawiające się zwłaszcza poniżej 50% obciążenia nominalnego silników, spowodowało rozpoczęcie poszukiwań paliw alternatywnych. Pierwszym z nich jest tzw. BIO-LNG pochodzące z procesów anaerobowej (beztlenowej) obróbki ścieków sanitarnych w oczyszczalniach, który właściwie nie wymaga ingerencji w istniejące rozwiązania silników gazowych, a staje się neutralną węglowo alternatywą dla paliw kopalnych. Równocześnie prowadzone są prace nad wykorzystaniem jako paliwa amoniaku. Z jednej strony wprowadza on istotne niebezpieczeństwo dla obsługi urządzeń, z drugiej daje możliwość wyeliminowania właściwie wszystkich szkodliwych składników spalin (należy pamiętać, że przy silnikach DF wciąż będzie istniała tzw. dawka pilotowa paliwa ciekłego), wprowadzając w zamian praktycznie czystą energię. Tu niestety trzeba pamiętać o istniejącym ryzyku wycieku amoniaku z przestrzeni spalania, znane obecnie z instalacji SCR. Alternatywą może być też zastosowanie jako paliwa metanolu (CH₃OH). Może być on powszechnie dostępnym paliwem odnawialnym, jednak wnosi znaczące zagrożenie pożarowe do siłowni jako paliwo o niskiej temperaturze zapłonu, tj. niższej niż 60°C wymaganej konwencją SOLAS dla pomieszczeń maszynowni zawierającej m.in silniki napędowe oraz kotły opalane [SOLAS..., Rozdz. II-2, Część B, Prawidło 4, 2015]. Najdalej idące są próby wykorzystania w charakterze paliwa wodoru. Tutaj mamy jednak obecnie do czynienia jedynie ze zgłoszeniami projektowymi lub prototypami. Ciekawym rozwiązaniem ograniczającym emisję spalin jest też mieszanie paliwa ropopochodnego z olejami roślinnymi, a szczególnie z ich estrami, też idące w kierunku neutralności węglowej stosowanych na statkach paliw.

W ograniczaniu emisji szkodliwych czynników do atmosfery, a przede wszystkim dekarbonizacji transportu morskiego, mogą być przydatne napędy elektryczne lub hybrydowe. Działania te mogą być wspomagane poprzez rozwój technologii magazynowania energii (Energy Storage System – ESS) [Fathima, Palanisamy 2018]. O ile jednak napędy elektryczne, nieocenione w takich zastosowaniach

jak żegluga promowa, mogą stanowić właściwie przeniesienie źródeł emisji, o tyle napędy hybrydowe mogą stanowić ciekawą alternatywę dla jednostek niemających stałych, powtarzalnych szlaków żeglugowych ograniczonych do niezbyt rozległych akwenów. Upowszechnienie się napędów hybrydowych może ponadto skłonić Administrację Morską RP do odważniejszego wprowadzania stref niskoemisyjnych lub zeroemisyjnych na polskich obszarach morskich oraz w obrębie portów zlokalizowanych np. w pobliżu uzdrowisk.

■ Podsumowanie

Ostatnie dwie dekady stanowią istotny przełom w postrzeganiu zagadnienia emisji związanej z eksploatacją jednostek pływających. Z jednej strony jest kładziony istotny nacisk na ograniczenie emisji substancji szkodliwych wytwarzanych w związku z pracą silników spalinowych. Z drugiej coraz wyraźniej zaczynają być dostrzegane działania na rzecz poprawy efektywności energetycznej jednostek pływających. Zmiany w przepisach dotyczących ich eksploatacji wymuszają prace nad udoskonalaniem obecnie wykorzystywanych źródeł napędu oraz tworzenie nowych, na razie prototypowych rozwiązań. Skutkiem tego w niedalekiej przyszłości powinna być dostępna cała gama możliwych do wykorzystania technologii, których główną ideą będzie istotne ograniczenie wpływu na środowisko naturalne, a przez to i na klimat.

Literatura:

- 40ton.net. 2016. Nowe europejskie ciężarówki palą tyle samo, co 25 lat temu, czyli o czym mówi się na łamach tirynatory.pl, <https://40ton.net/nowe-europejskie-ciezarowki-pala-tyle-samo-co-25-lat-temu-czyli-o-czym-mowi-sie-na-lamach-tirynatory/> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- ABS advisory on NO_x Tier III compliance. 2020. American Bureau of Shipping, <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS-Advisory-on-NOx-Tier-III-Compliance-20068.pdf> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- GUS. 2021. Gospodarka morska w Polsce w 2020 roku, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/transport/gospodarka-morska-w-polsce-w-2020-roku,7,18.html> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- GUS. 2021. Transport – wyniki działalności w 2020 roku, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/transport/transport-wyniki-dzialalnosci-w-2020-roku,9,20.html> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- Emisje z samolotów i statków: fakty i liczby (infografika) 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20191129STO67756/emisje-z-samolotow-i-statkow-fakty-i-liczby-info-grafika> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- Fathima A.H., Palanisamy K. 2018. Renewable systems and energy storages for hybrid systems. Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids. Integration, Developments and Control. Woodhead Publishing Series in Energy, 2018, Pages 147-164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102493-5.00008-X> (dostęp w dn.: 25.03.2022).
- Kołtżan K. 2006. Zapobieganie zanieczyszczeniu powietrza przez statki – realizacja wymogów załącznika VI do Konwencji MARPOL 73/78 przez Polski Rejestr Statków S.A. XXVII Sympozjum Siłowni Okrętowych, Szczecin 2006, <https://www.prs.pl/uploads/kkolzwanreferat.pdf> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

MARPOL. 2015. Zmiany do Protokołu I oraz do załączników do Międzynarodowej konwencji o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973, sporządzonej w Londynie dnia 2 listopada 1973 r., zmienionej Protokołem sporządzonym w Londynie dnia 17 lutego 1978 r. oraz uzupełnionej Protokołem przyjętym w Londynie dnia 26 września 1997 r., przyjęte w Londynie w okresie od dnia 5 grudnia 1985 r. do dnia 4 kwietnia 2014 r. (Dz. U. 2016 r. poz. 761).

PRD Fire Solutions. Stałe urządzenia gaśnicze gazowe, <https://www.prd-fs.pl/nasza-oferta/urządzenia-gasnicze-gazowe.html> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Rezolucja MEPC.308(73). 2018. Rezolucja Komitetu Ochrony Środowiska Morskiego nr MEPC.308(73), [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf) (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1005/2009 z dnia 16 września 2009 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1005> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Sea-LNG.org. 2022. LNG – a fuel in transition. https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/01/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_V937.pdf (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Ship and Bunker. 2017. LNG-Fuelled ships to more than double by 2020: Energy aspects. <https://shipandbunker.com/news/world/788575-lng-fuelled-ships-to-more-than-double-by-2020-energy-aspects> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

SOLAS Chapter II-2. 2015. <https://www.gov.uk/government/publications/solas-chapter-ii-2> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

United States Environmental Protection Agency. 2000. Volatile organic compounds, https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/substreg/searchandretrieve/advancedsearch/search.do?details=display-Details&selectedSubstanceId=83723 (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. 2021.0.1973).

Winterthur Gas & Diesel. 2022. General Technical Data (GTD). <https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-gtd/> (dostęp w dn.: 25.03.2022).

Witkowski K. 2016. Problematyka zanieczyszczenia atmosfery przez statki wykorzystywane w transporcie morskim. Bezpieczeństwo i ekologia, Autobusy, 6/2016, 468-473.

Włodarski J.K., Witkowski K. 2006. Okrętowe silniki spalinowe. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia.

Rozdział 7

Ocena wybranych technicznych rozwiązań na statkach morskich w kontekście ochrony klimatu

inż. Jakub Szymonowicz

dr inż. Agnieszka Deja

dr hab. kpt. ż.w. Wojciech Ślęczka, prof. PM

Politechnika Morska w Szczecinie

■ Wstęp

Jednym z bardzo ważnych celów wyznaczanych w ramach obecnie prowadzonej polityki wspólnotowej jest zrównoważony rozwój, który polega na wzajemnym umacnianiu wzrostu gospodarczego, dobrobytu społecznego i ochrony środowiska. Sama koncepcja „idei zrównoważonego rozwoju” zrodziła się na II Sesji Zarządzającego Programu Ochrony Środowiska ONZ w 1975 r. Założono wówczas, że rozwój gospodarczy nie powinien naruszać w sposób nieodwracalny stanu środowiska i prowadzić do degradacji biosfery, w wymiarze godzącym we wszelkie prawa [Poskrobko 2009]. Światowa Komisja ds. Środowiska i Rozwoju ONZ w 1987 r. w Raporcie Brundtland zaprezentowała definicję, zgodnie z którą zrównoważony rozwój to „rozwój, który zaspokaja potrzeby współczesności, nie odbierając przyszłym pokoleniom zdolności do zaspokojenia ich własnych potrzeb” [Report of the World... 1987].

W naukowym wymiarze problematyka uwzględniająca aspekty ekologiczne, w tym ochronę klimatu, cieszy się coraz większym zainteresowaniem. Zagadnienia z zakresu zrównoważonego rozwoju są obecnie bardzo popularne w opracowaniach naukowych, ponieważ odnoszą się do wielu obszarów. Działania wszystkich sektorów gospodarki powinny być nakierowane na zapewnienie takiego rozwoju, który będzie jednocześnie ekologiczny, ekonomiczny i społeczny [Transforming our world...

2015]. Należy wskazać, że wraz z zasadami solidarności, subsydiarności oraz spójności ekonomiczno-społecznej, ww. działania stanowią podstawę wspólnotowych programów rozwojowych. Prowadzone obecnie przez UE przedsięwzięcia nakierowane są m.in. na zwiększenie roli przyjaznych dla środowiska i klimatu gałęzi transportu, które mają bezpośrednio wpłynąć na zmniejszenie ich ekologicznej uciążliwości, co powoduje jednocześnie konieczność zmiany podejścia do jego rozwoju.

Transport morski uznawany jest za jedną z najbardziej ekonomicznych i ekologicznych gałęzi transportu, uwzględniając przede wszystkim skalę realizowanych przewozów ładunków. Należy jednak wskazać, że nie pozostaje on obojętny dla środowiska, pomimo wykorzystywania najnowszych technologii [Deja i in. 2021a]. Dotyczy to w dużej mierze emisji przez statki szkodliwych związków do atmosfery, nie tylko podczas podróży, ale także w trakcie obsługi w portach morskich. W związku z powyższym bardzo istotne jest poszukiwanie rozwiązań technicznych dla statków morskich, które mają bezpośredni wpływ na ochronę klimatu. Autorzy dokonali m.in. przeglądu i oceny nowoczesnych rozwiązań, które obecnie są wykorzystywane w światowej flocie, jak również tych, które są prezentowane jako koncepcyjne. Przedmiotowa ocena stanowi kontynuację badań wstępnie przeprowadzonych w ramach pracy inżynierskiej pt. „Ocena wybranych technicznych rozwiązań na statkach morskich w kontekście zrównoważonego rozwoju transportu” [Szymonowicz 2022]. Kolejne działania badawcze obejmowały m.in. szczegółowy przegląd materiałów pochodzących od producentów poszczególnych rozwiązań oraz przeprowadzenie oceny (z wykorzystaniem metody eksperckiej) prezentowanych rozwiązań technicznych w aspekcie środowiskowym i eksploatacyjnym. Omawiana tematyka jest nowa i bardzo istotna m.in. ze względu na konieczność ograniczenia emisji dwutlenku siarki ze statków morskich szczególnie w regionie Morza Bałtyckiego. Należy wskazać, że literatura przedmiotu w zakresie nowoczesnych, ekologicznych rozwiązań technicznych dla statków morskich jest ograniczona. W związku z powyższym do ich weryfikacji wykorzystano wiedzę i doświadczenie ekspertów z długoletnim stażem w żegludze morskiej.

Od 2008 r. wprowadzone zostały zmiany do załącznika VI Konwencji MARPOL 73/78 przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) w zakresie wymagań dotyczących zapobiegania zanieczyszczeniu powietrza przez statki. Organizacja wprowadziła rygorystyczne limity względem obszarów kontroli emisji (ECA), do których zostały zaliczone: Morze Bałtyckie, Morze Północne, rejon Północnoamerykański oraz obszar Morza Karaibskiego Stanów Zjednoczonych. Ograniczenia te obejmują zanieczyszczenia zaliczane do Załącznika VI i nakazują kontrolę emisji tlenków siarki (SO_x) i tlenków azotu (NO_x) dla norm emisji NO_x poziomu III. Obecnie obowiązujące ograniczenie dla Bałtyku w zakresie emisji SO_x wynosi 0,10 % m/m, natomiast poza jego obszarem górna granica udziału procentowego siarki w składzie paliwa powinna wynosić 0,50% m/m. Na tej podstawie m.in. statki uprawiające żeglugę w rejonie Morza Bałtyckiego zostały zobowiązane do wdrożenia rozwiązań mających na celu ograniczenie emisji szkodliwych związków [Prevention of Air Pollution...; Wymagania IMO dotyczące... 2018].

W 2018 r. Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) przyjęła „Wstępną strategię IMO ws. redukcji emisji gazów cieplarnianych ze statków (GHG)”. Dokument ten stanowi bardzo istotne zobowiązanie społeczności międzynarodowej w dążeniu do ograniczania emisji gazów cieplarnianych

z jednostek pływających o 50% do 2050 r., a dwutlenku węgla nawet o 70% względem 2008 r. Strategia na lata 2018-2030 zakłada m.in. wprowadzanie zmian w obecnych przepisach oraz wprowadzenie szeregu obostrzeń dotyczących emisji szkodliwych związków przez jednostki pływające. Zgodnie z przyjętymi założeniami w najbliższych latach będą musiały zostać wprowadzone ekologiczne rozwiązania na statkach, techniczne i eksploatacyjne, ograniczające szkodliwe emisje do atmosfery. W 2023 r. ma powstać plan dotyczący paliw o niskiej oraz zerowej emisji CO₂ [Resolution MEPC.304 (72) 2018].

W realizowanym procesie transformacji prowadzącej do neutralności klimatycznej Europy także sektor transportu i przemysł stoczniowy zostaną objęte tymi zmianami. Szczególnym priorytetem UE w tym zakresie jest modernizacja tych obszarów gospodarki, które są najbardziej energochłonne [UE COM/2020/102].

Należy wskazać, że nie tylko aspekty prawne, ale także względy ekonomiczne powodują konieczność poszukiwania i wdrażania nowoczesnych, ekologicznych rozwiązań technologicznych, które mogłyby zostać wykorzystane na statkach morskich. Ceny paliw żeglugowych w ostatnich latach, m.in. ze względu na sytuację polityczno-gospodarczą na świecie, wykazują olbrzymią dynamikę. W marcu 2022 r. średnia miesięczna cena lekkiego paliwa żeglugowego o zawartości siarki do 0,5% m/m VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil) kształtowała się na poziomie 921 USD za tonę, w porównaniu z analogicznym okresem ubiegłego roku nastąpił wzrost na poziomie 82% (505 USD), a względem 2020 r., aż o 109% (440 USD) [Global Average... 2022].

Obecnie wiele statków morskich nadal wykorzystuje paliwa ciężkie, a ograniczenia w zakresie szkodliwych emisji są realizowane przez zastosowanie odpowiedniej technologii. Działania te realizuje się m.in. przez systemy oczyszczania gazów spalinowych lub płuczki (skrabery) pozwalające na oczyszczenie szkodliwych gazów. Uwzględniając aktualną sytuację gospodarczą na świecie, ich instalacja i utrzymanie są często bardziej opłacalne dla armatorów niż używanie paliwa typu VLSFO. Należy wskazać, że urządzenia te wymagają zatwierdzenia przez organy administracji morskiej. W obliczu stale rosnących kosztów eksploatacyjnych na statkach morskich szczególnie istotne jest poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych, które mogą zapewnić zwiększenie efektywności energetycznej jednostki oraz zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do środowiska. Według statystyk opracowanych przez Clarksons obecnie 20% statków w światowej flocie wykorzystuje skrabery, a względem 25% jednostek można użyć określenia „modern eco” [Enabling global trade... 2021].

Zrównoważony rozwój transportu morskiego

Rozwój techniczno-technologiczny społeczeństwa w dobie gospodarki globalnej i rozwoju handlu międzynarodowego powoduje konieczność przemieszczania dużych ilości dóbr na duże odległości. Takie działania otwierają nowe możliwości dla rozwoju potencjału transportu morskiego, który w tym zakresie pełni dominującą rolę. Stworzenie zrównoważonego transportu morskiego, wypełniającego

w pełni założenia rozwoju zrównoważonego, jest przedsięwzięciem wymagającym podjęcia szeregu działań przez społeczność międzynarodową na wielu płaszczyznach. Jest to ważne m.in. ze względu na olbrzymi ekologiczny potencjał tej gałęzi transportu, która ma realne szanse na skuteczną rywalizację z transportem lądowym. W związku z powyższym, jego zastosowanie idealnie wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju [Restructuring the maritime... 2007].

Uwzględniając obecne kierunki innowacji w przemyśle okrętowym promowane przez Unię Europejską, należy skupić się na trzech głównych obszarach, które obejmują:

- obniżenie negatywnego wpływu oddziaływania statku na środowisko naturalne,
- poprawę efektywności ekonomicznej w zakresie eksploatacji statków,
- zwiększenie poziomu bezpieczeństwa jednostek [Przepisy Nadzoru Konwencyjnego Statków Morskich 2022].

W ostatnich latach obserwujemy systematyczny wzrost przewozów w obrębie UE organizowanych z wykorzystaniem transportu morskiego. Według danych EMSA (European Maritime Safety Agency) aż 77% europejskiego handlu zewnętrznego i 35% całego handlu pomiędzy państwami Wspólnoty jest realizowana drogą morską [European Maritime Transport... 2021]. Clarksons Research wskazuje, że w grudniu 2021 r. światowa flota przekroczyła 100 tys. statków [Enabling global trade... 2021]. Wzmożony ruch statków przemieszczających się po międzynarodowych szalkach wodnych oraz zwiększona liczba obsługiwanych jednostek w portach morskich powoduje jednocześnie wzrost skali potencjalnych zagrożeń środowiskowych z tym związanych.

Zgodnie z najnowszymi danymi transport morski odpowiada za 13,5% całkowitej emisji gazów cieplarnianych z transportu w Unii Europejskiej. Statystyki wskazują, że w 2018 r. statki obsługiwane w portach Wspólnoty i Europejskiego Obszaru Gospodarczego odpowiadały za emisję 140 mln t CO₂ w 2018 r., co stanowiło w przybliżeniu 18% wszystkich emisji CO₂ na świecie. W zakresie emisji dwutlenku siarki (SO₂) w 2019 r. osiągnięto poziom 1,63 mln ton [European Maritime Transport... 2021].

W ramach działalności IMO, opracowanych zostało wiele wytycznych, które powinny przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej statków już na etapie ich projektowania i budowy. Obecnie konstruktorzy (od 1 stycznia 2013 r.) przy projektowaniu nowych oraz przy przebudowie starszych modeli są zobowiązani m.in. do stosowania konstrukcyjnego współczynnika efektywności energetycznej statku (EEDI – Energy Efficiency Design Index). Jest on wykorzystywany do określenia zależności występującej pomiędzy zużytym paliwem a emisją szkodliwych substancji oraz CO₂ do atmosfery przez dany statek. Przy obliczaniu EEDI uwzględnia się dwie główne grupy parametrów, którymi są te związane z siłowniami okrętowymi oraz te dotyczące możliwości eksploatacyjnych statku [Przepisy Nadzoru Konwencyjnego... 2022].

Względem statków będących w eksploatacji wprowadzono obowiązek sporządzania planu zarządzania efektywnością energetyczną statku (SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan). Jest to dokument opracowany przez IMO w celu monitorowania emisji szkodliwych związków na statkach

morskich. Przygotowuje się go dla czterech obszarów, które obejmują: planowanie, prace projektowe, wdrożenie oraz monitoring. Ma on na celu poprawę parametrów eksploatacyjnych statku podczas długich rejsów, m.in. poprzez stosowanie odpowiednich metod zarządzania energią oraz zużyciem paliwa. Odpowiednio stworzony SEEMP pozwala na indywidualne podejście do danej jednostki, uwzględniając jego parametry techniczne oraz przeznaczenie. Takie działania mają przyczynić się do optymalnego wykorzystania potencjału energetycznego jednostki, a jednocześnie powinny bezpośrednio przełożyć się na mniejszą emisję zanieczyszczeń oraz wpłynąć na zwiększenie efektywności ekonomicznej podróży.

Do monitorowania realizacji planu SEEMP w zakresie kontroli efektywności energetycznej jednostki podczas jej eksploatacji jest wykorzystywany eksploatacyjny wskaźnik efektywności energetycznej statku (EEOI – Energy Efficiency Operational Indicator). Określa się go na podstawie zużycia paliwa przez statek, który przewozi określoną ilość ładunku w danym rejsie. W celu zwiększenia dokładności wskaźnika uwzględniono w nim wpływ czynników wewnętrznych i zewnętrznych działających na statek podczas żeglugi. [Wysocki 2017, Resolution MEPC.1/Circ.684 17, 2009].

Rozpatrując zagadnienia związane z rozwojem zrównoważonym transportu morskiego w zakresie m.in. ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenia efektywności energetycznej przy jednoczesnym wykorzystaniu energii pochodzącej ze źródeł niskoemisyjnych [UE COM/2020/102], należy także zwrócić uwagę na działania, które są realizowane od strony lądu. W tym zakresie istotne jest, że statki morskie wymagają bezpośredniej obsługi także w portach, dokach oraz stoczniach. Wszelkie czynności eksploatacyjne realizowane w obrębie jednostki pływającej, prowadzone na terenach portowych, powodują również olbrzymie zużycie energii oraz generują szkodliwe emisje. Większość portów europejskich położona jest w bezpośrednim sąsiedztwie dużych aglomeracji miejskich, co powoduje, że generowane przez statki zanieczyszczenia oddziałują bezpośrednio na obszary o gęstym zaludnieniu [Deja i in. 2021b].

W związku z powyższym, bardzo istotne jest podejmowanie działań zarówno bezpośrednio na statkach jak i w portach morskich, które całkowicie wyeliminują lub w dużym stopniu ograniczą te negatywne aspekty. Odpowiedzią na te oczekiwania jest wprowadzanie przez część portów kluczowych dla transportu morskiego w Europie rozwiązań ekologicznych. Koncepcja „zielonego portu” zakłada ograniczenie negatywnego wpływu zanieczyszczeń generowanych w obrębie portu i promowanie działań przyjaznych dla środowiska. Obejmują one m.in. szerokie wsparcie techniczne i operacyjne względem statków wykorzystujących ekologiczne rozwiązania. Zgodnie z koncepcją „zielonych portów” nowoczesne ekologiczne statki powinny być obsługiwane na preferencyjnych warunkach [Żukowska i in. 2021].

W zakresie technicznej obsługi powinny być promowane rozwiązania umożliwiające organizację przeładunków opartą na urządzeniach zasilanych elektrycznie. W aspekcie prowadzonej transformacji klimatycznej bardzo istotne jest, żeby jak najwięcej portów w Unii Europejskiej było dostosowywanych do obsługi statków korzystających z nabrzeżnych stacji zasilania w energię elektryczną w trakcie ich postoju. Rozwiązania obejmujące założenia „zielonych portów” zostały już wprowadzone

m.in. w Hamburgu i Rotterdamie oraz portach skandynawskich. Zgodnie z przyjętą strategią ochrony środowiska dla portu w Hamburgu szkodliwe emisje mają zostać zmniejszone o 80% do 2050 r. w porównaniu z 1990 r. Realizacja tego celu wymaga podjęcia szeregu działań, które obejmują m.in. konieczność zaangażowania w jego realizację większości podmiotów działających bezpośrednio na obszarze portu [Green Port – der Hamburger...]. Podobnie w porcie w Rotterdamie w celach do 2050 r. uwzględniono realizację celu, jakim jest „prawie zerowa emisja”. Także polskie porty będą w najbliższych latach te działania realizować. Obecnie bardzo istotne jest budowanie przyjaznych relacji z otoczeniem, co zostało wskazane m.in. w przyjętej w 2014 r. „Strategii rozwoju Portu Gdynia do 2027 roku”.

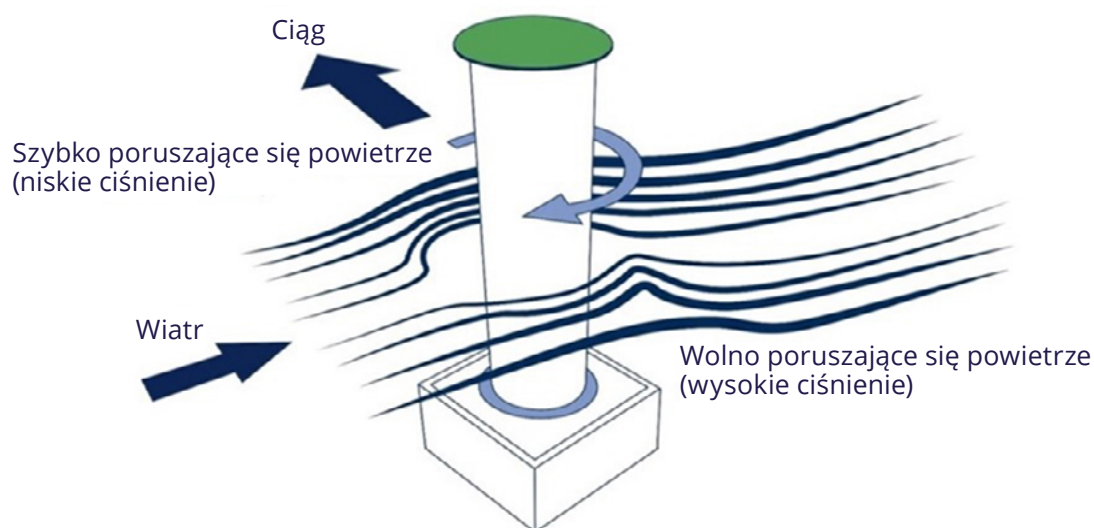
■ Charakterystyka wybranych rozwiązań na statkach morskich

Napędy żaglowe

Rotor Sail

Rotor Sail pełni funkcję wsparcia dla napędu głównego na statku morskim. Rozwiązanie przedsiębiorstwa Norsepower działa opierając się na efekcie Magnusa. Główny element tego rozwiązania stanowią specjalne walcowate konstrukcje, które obracają się na pokładzie jednostki podczas żeglugi, przy odpowiednim kursie względem wiatru (**rysunek 7.1**). Pozwala to na ograniczenie pracy silnika głównego, co bezpośrednio przyczynia się do zmniejszonego zużycia paliwa, a tym samym obniżenia emisji zanieczyszczeń. System ten jest w pełni zautomatyzowany, panel kontrolny zapewnia załodze monitorowanie i sterowanie systemem. Żagle rotacyjne zasilane są energią elektryczną z sieci niskiego napięcia jednostki pływającej. Działania te pozwalają na stały monitoring siły wiatru i tym samym na optymalne wykorzystanie rotorów. Norsepower Rotor Sails podkreśla, że żagle Rotor Sail ograniczają w dużym stopniu emisję CO₂, co ma bezpośrednie przełożenie na zmniejszenie śladu węglowego podczas rejsu. Zgodnie z prezentowanym przez producenta informacjami, zainstalowane na statku Maersk Pelican żagle Rotor Sail w pierwszym roku ich eksploatacji ograniczyły zużycie paliwa o 8,2% oraz spowodowały redukcję śladu węglowego na podobnym poziomie. Względem innych statków uzyskano następujące ograniczenia szkodliwych emisji: M/W Kopenhaga (4-5%), M/W Estraden (6,1%), SC Connector: 25% i Sea Zhoushan 8%. Szacuje się, że przy odpowiedniej konfiguracji poprawa wskaźnika EEDI dla określonych jednostek może sięgać nawet 20% [Norsepower Rotor Sail].

Wartsila (dostawca systemu Anemol Rotor Sail) podkreśla, że żagle Rotor są dobrym rozwiązaniem dla większości nowobudowanych jednostek: tankowców, gazowców LNG i LPG, promów i RoRo, włącznie z modernizowanymi masowcami (z przekładnią lub bez przekładni). Producent wskazuje, że system może zmniejszyć zużycie paliwa i związaną z tym emisję gazów cieplarnianych nawet o 30% [Rotor Sail technology ...]



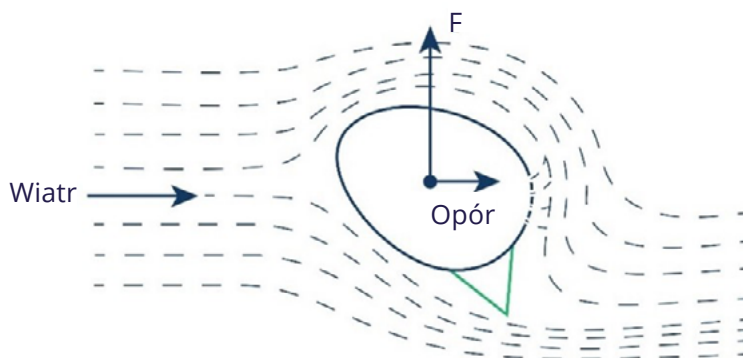
Źródło: Opracowano na podstawie <https://www.norsepower.com/technology>.

Rysunek 7.1. Zastosowanie efektu Magnusa w Rotorze Flettnera

Wykorzystanie wiatru jako napędu wspomagającego na statkach morskich umożliwiają także rozwiązania techniczne WASP (Wind-Assisted Propulsion Systems), oferowane przez przedsiębiorstwo Bound4blue. Systemy te zostały zaprojektowane w celu ograniczenia zużycia paliw konwencjonalnych na statkach morskich.

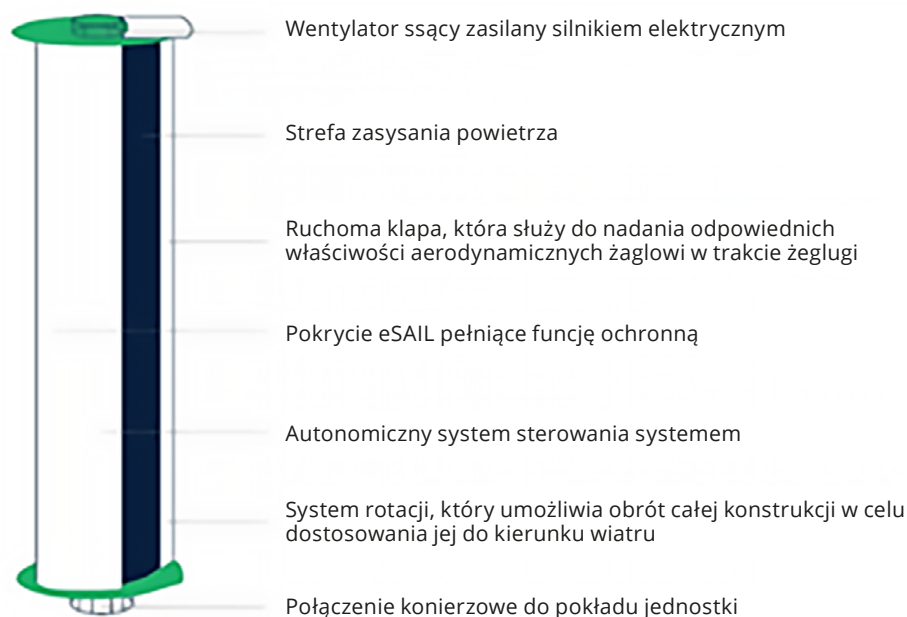
eSAIL

Rozwiązanie firmy Bound4blue eSAIL funkcjonuje w oparciu o konstrukcję przypominającą wyglądem podłużny walec eliptyczny. Działanie eSAIL polega na zasysaniu części opływającego go powietrza, która dzięki odpowiedniemu ustawieniu ponownie zaczyna otaczać jego powierzchnię, wytwarzając siłę nośną, która jest nawet siedmiokrotnie większa niż przy wykorzystaniu żagla konwencjonalnego [Rigid sails...]. Schemat pracy żagla eSAIL został przedstawiony w rzucie poziomym na **rysunku 7.2**, a konstrukcja eSAIL zaprezentowano na **rysunku 7.3**.



Źródło: Opracowano na podstawie <https://bound4blue.com/en/esail>.

Rysunek 7.2. Schemat pracy żagla eSAIL



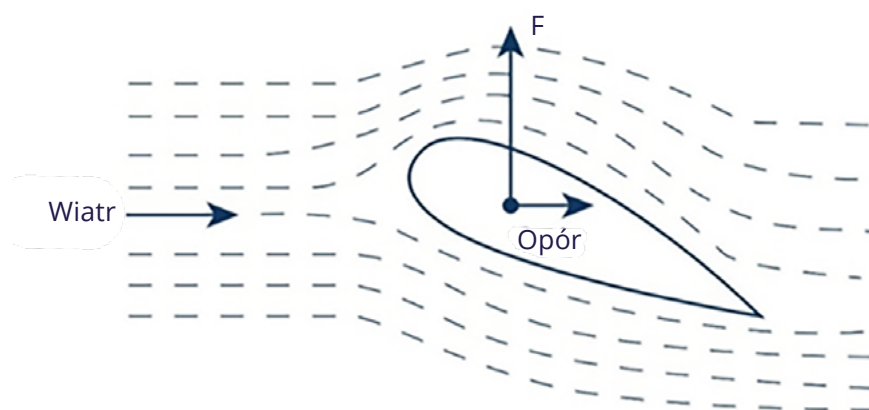
Źródło: Opracowano na podstawie <https://bound4blue.com/en/esail>.

Rysunek 7.3. Konstrukcja eSAIL

Zgodnie z przedłożonymi przez producenta informacjami, drobnicowiec M/V EEMS Traveler o nośności 2850 DWT wyposażony w technologię napędu wspomaganego wiatrem (eSAIL) dostarczoną przez boun4blue, podczas eksploatacji ma wygenerować oszczędności kosztów paliwa statkowego oraz redukcję CO₂ na poziomie 30% [bound4blue to equip Amasus' general ...2022].

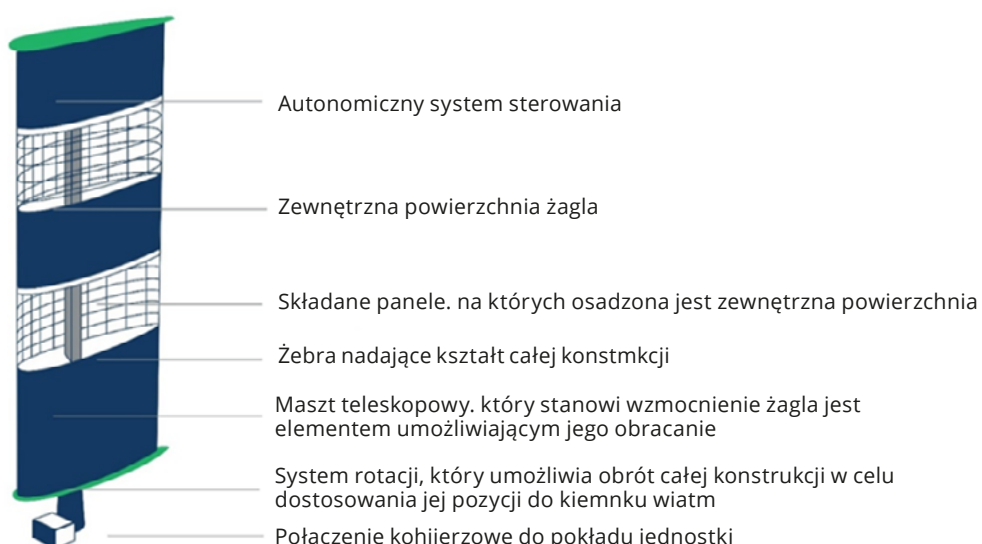
WINGSAIL

Kolejnym rozwiązaniem typu WASP, opracowanym przez przedsiębiorstwo Bound4blue, jest WINGSAIL. Podczas konstruowania żagla wykorzystano zasady aerodynamiki tożsame dla skrzydeł samolotów. W aspekcie technicznym po zawietrznej stronie żagla powstaje obszar niskiego ciśnienia, a na nawietrznej obszar wysokiego ciśnienia. Umożliwia ona optymalne ustawienie WINGSAIL (pod odpowiednim kątem) względem wiatru podczas żeglugi. W trakcie wykonywanej pracy wytwarzany jest ciąg, którego kierunek oraz zwrot pokrywają się z kursem statku. Pod względem efektywności energetycznej istotne jest, że generowanie ciągu nie potrzebuje poboru energii. Omawiana technologia jest w pełni autonomiczna i nie wymaga specjalnych umiejętności załogi w trakcie eksploatacji [WINGSAIL's operational...]. Schemat pracy WINGSAIL został przedstawiony w rzucie poziomym na **rysunku 7.4**.



Źródło: Opracowano na podstawie <https://bound4blue.com/en/wingsail>.

Rysunek 7.4. Schemat pracy żagla WINGSAIL



Źródło: Opracowano na podstawie <https://bound4blue.com/en/wingsail>.

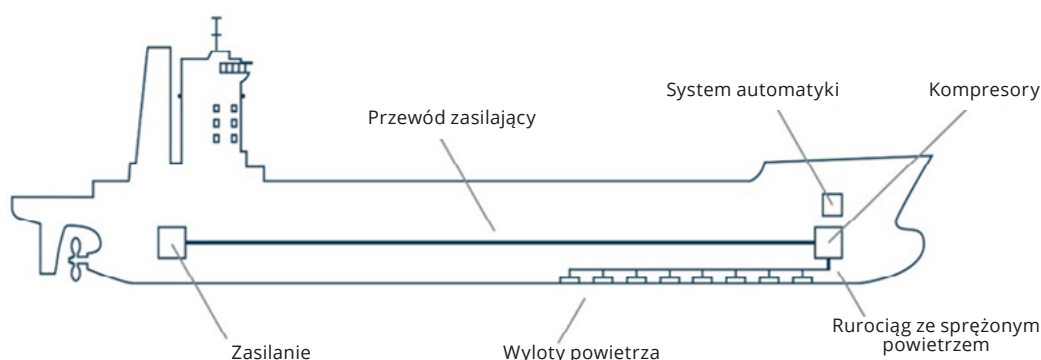
Rysunek 7.5. Konstrukcja WINGSAIL

Spośród firm, które postanowiły zainwestować w nowatorskie, koncepcyjne rozwiązania wykorzystujące żagle na statkach morskich, jest Wallenius Wilhelmsen. Dla przedsiębiorstwa, jest to kolejny krok, który realizuje w kierunku promowania ekologicznego transportu morskiego. W ramach projektu Orcele Wind, obecnie w trakcie budowy jest statek typu Ro-Ro; wodowanie jednostki zaplanowane jest na 2025 r. Zgodnie z przyjętymi założeniami statek będzie miał długość 220 m i szerokość 40 m. Takie parametry techniczne umożliwią transportowanie około 7000 pojazdów. Proponowane rozwiązanie w zakresie wykorzystania nowatorskiego ekologicznego napędu ma ograniczyć emisję szkodliwych związków do atmosfery o 90% w porównaniu z obecnie wykorzystywanymi napędami dla analogicznego typu jednostki. Zgodnie z przedłożonymi przez przedsiębiorstwo informacjami, statek będzie przemieszczał się z prędkością 10-12 węzłów, co z pewnością będzie powodowało ograniczenia podczas jego eksploatacji [Orcele Wind – introducing...2021].

Bardzo ciekawym pod względem ekologicznym jest koncepcyjne, kompleksowe rozwiązanie proponowane przez Oceanbird. Projekt zakłada zaprojektowanie specjalnego kadłuba, żagli skrzydłowych oraz wyznaczeniu optymalnych parametrów dotyczących prędkości i trasy statku. Główna siła energetyczna jest generowana z wiatru. Koncepcyjna konstrukcja żagla ze względu na swój aerodynamiczny kształt przypomina skrzydło samolotu. Składa się ono z grota i kłapy, która optymalizuje siły aerodynamiczne. Oceanbird wskazuje, że wykorzystanie pojedynczego skrzydła (w oparciu o realizację przewozów wzdłuż głównych szlaków handlowych) ma wygenerować oszczędność paliwa względem każdego żagla skrzydłowego o 480 000 litrów, co przekładać się ma na ograniczenie emisji CO₂ nawet o 1200 ton na rok [The Oceanbird concept].

Technologia Air Lubrification System

Air Lubrification System (system smarowania kadłuba statku sprężonym powietrzem) jest to rozwiązanie wykorzystywane na statkach morskich, które ma zapewnić techniczne utrzymywanie warstwy pęcherzyków powietrza pod dnem statku. Jego zadaniem jest zmniejszenie oporów hydrodynamicznych podczas żeglugi, co pozwala odciążyć silnik główny jednostki, a tym samym spowodować ograniczenie zużycia paliwa. Przedsiębiorstwem, które opracowało ten autorski system jest Silverstream Technologies (**rysunek 7.6**).



Źródło: Opracowano na podstawie <https://www.youtube.com/watch?v=WzIXz0Zc-lo&t=21s> silverstream.

Rysunek 7.6. Konstrukcja Silverstream System

W zależności od charakterystyki technicznej statku, instalacja Silverstream System pozwala zmniejszyć koszty paliwa o 5-10% netto oraz ograniczyć emisję spalin. Air Lubrification System może zostać zamontowany zarówno na nowych, jak i starszych jednostkach (**tabela 7.1**). Zgodnie z informacjami przedłożonymi przez producenta technologia ta nie jest szczególnie wymagająca ani pod względem konstrukcyjnym ani eksploatacyjnym [What is Air Lubrification?]. Po zainstalowaniu systemu na statku zostaje przeprowadzone szkolenie dla załogi, po którym możliwa jest jego bieżąca eksploatacja bez specjalistycznych uprawnień.

Tabela 7.1. Wybrane statki wyposażone w Silverstream System

Wybrane statki wyposażone w Silverstream System						
Nazwa statku	Rodzaj statku	Długość statku [m]	Szerokość statku [m]	DWT statku [t]	Rodzaj projektu	Oszczędność netto [%]
Methane Patricia Camila	zbiornikowiec LNG	291,07	45,04	86 272	instalacja na starszej jednostce	6,6
ECO VALENCIA	Ro-Ro	238	34	24 000	nowa jednostka	5-7
DIAMOND PRINCESS	statek pasażerski	290	37,75	14 601	instalacja na starszej jednostce	5
SAPPHIRE PRINCESS	statek pasażerski	290	37,75	14601	instalacja na starszej jednostce	>5
REGAL PRINCESS	statek pasażerski	330	44	12193	instalacja na starszej jednostce	5-10
SHANDONG-ZIHE	Zbiornikowiec	175,97	31,03	40059	instalacja na starszej jednostce	4,3
NORWEGIAN JOY	statek pasażerski	333,46	48	11700	instalacja na starszej jednostce	5-10
SEA VICTORIA	Masowiec	340	62	324 268	nowa jednostka	5-10
ECO BARCELONA	Ro Ro cargo	238	34	67 311	nowa jednostka	5-7
ECO LIVORNO	Ro Ro cargo	238	34	24 000	nowa jednostka	5-7
ECO CATANIA	Ro Ro cargo	238	34	24 000	nowa jednostka	5-7
ECO SAVONA	Ro Ro cargo	238	34	24 000	nowa jednostka	5-7
ECO MALTA	Ro Ro cargo	238	34	24 000	nowa jednostka	5-7
FINNECO-I	Ro Ro cargo	238	35	24 000	nowa jednostka	5-10
METHANE PATRICIA CAMILA	zbiornikowiec LNG	291,07	45,04	86 272	instalacja na starszej jednostce	6

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [Operational vessels 2021; MarineTraffic 2022; MSC Orders More... 2021; Emissions Bertram 2019].

Przeprowadzone przez przedsiębiorstwa Nippon Yusen Kaisha oraz dwie spółki Grupy NYK, Monohakobi Technology Institute (MTI) i NYK-Hinode Line Ltd. dwuletnie testy morskie na jednostkach Yamato i Yamatai wykazały, że zainstalowanie systemu smarowania powietrzem w warunkach normalnej żeglugi wpływa na ograniczenie emisji CO₂ średnio o 6% [Air-Lubrication system...]

Zgodnie z informacjami prezentowanymi przez Mitsubishi Heavy Industries dla rozwiązania MALS (Mitsubishi Lubrification System), które zostało zamontowane na statkach kontenerowych, system ten pozwala na ograniczenie emisji CO₂ o 25% oraz ograniczenie zużycia energii o 10% w stosunku do tradycyjnych rozwiązań [Midor i in. 2017].

Skrabery

Skraber (płuczka spalin) to specjalna instalacja połączona z systemem silnika głównego na statku, która służy do ograniczenia emisji SO_x oraz NO_x powstałych w wyniku procesu spalania paliwa okrętowego. Obecnie na statkach morskich stosowane są trzy rodzaje mokrych skraberów — systemy z obiegiem otwartym lub zamkniętym oraz systemy hybrydowe [Understanding exhaust gas treatment systems 2012]. Technologia ta ma bardzo dużą efektywność w zakresie oczyszczania spalin ze szkodliwych związków, jej sprawność w tym zakresie kształtuje się na poziomie 95% dla SO_x i 90% względem NO_x (przy wykorzystaniu technologii SCR) [Pawlak 2013]. Rozwiązanie to jest bardzo wymagające w zakresie przygotowania specjalnych systemów na statku, co jest związane z koniecznością poniesienia przez armatora dodatkowych kosztów (kilka tysięcy euro). Należy także wskazać, że w trakcie eksploatacji tej instalacji pojawia się zwiększone zapotrzebowanie na energię, co ma bezpośrednie przełożenie na wzrost zużycia paliwa (do 3%). Największym jednak problemem stosowania tego rozwiązania jest tworzenie się zanieczyszczenia (szlamu) podczas procesu oczyszczania spalin. Ze względów środowiskowych bardzo istotne jest, aby odpad został przekazany do odpowiednich urzędów odbiorczych w portach [A Guide To Scrubber... 2021].

Instalacja działająca w układzie otwartym przepłukuje spaliny wodą zaburtową w postaci rozpylonej chmury, która po zaabsorbowaniu tlenków siarki zostaje wydalona z obiegu i trafia z powrotem do akwenu. Woda, która jest wykorzystana do realizacji całego procesu jest zanieczyszczona wieloma substancjami szkodliwymi, takimi jak: wanad, nikiel i ołów, ma zwiększone stężenia azotanów, pH na poziomie 3 oraz podwyższoną temperaturę. W systemie otwartym jest ona odprowadzana do wód morskich, co w wymiarze środowiskowym jest bardzo niekorzystne dla ekosystemu [Endres i in. 2018].

Przykładowo skraber działający w systemie otwartym zainstalowany na promie P&O m/f Pride of Kent, pozwala na ograniczenie emisji SO_x o 98% oraz zapewniła redukcję cząstek stałych o 70%. Dla promu Holland America Line m/f Zaandam wartości w zakresie emisji SO_x, zostały obniżone o 75%, a cząstek stałych o 57% [Midor i in. 2017].

W przypadku systemu zamkniętego, woda krąży w obiegu zamkniętym i wymaga oczyszczania środkami chemicznymi. Natomiast skrabery funkcjonujące w systemie hybrydowym pozwalają użytkownikowi na dowolne przełączanie się między pracą w obiegu otwartym a zamkniętym [Nowicki,

Polasz 2016]. Na statkach morskich montuje się również suche systemy oczyszczania spalin, które do pochłaniania tlenków siarki wykorzystują absorbenty w postaci granulek wodorotlenku wapnia. Dzięki takiemu rozwiązaniu następuje reakcja chemiczna, w wyniku której jako produkt końcowy powstaje gips [Mikuła 2017]. W przypadku sraberów typu suchego wskazuje się na organicznie emisji SO_x na poziomie 99%, a cząstek stałych o 80% [Midor i in. 2017; Myśków 2017].

Napędy alternatywne

LNG

Należy wskazać, że emisje szkodliwych związków takich jak tlenek azotu NO_x , generowanych przez napędy statków, są pochodną parametrów procesu spalania. Skala emisji zależy przede wszystkim od temperatury. W związku z powyższym wartości emisyjne NO_x będą się różnić w zależności od wykorzystywanej technologii. W związku z tym, że zastosowanie LNG w niskociśnieniowych silnikach ma bezpośredni wpływ na ograniczenie tych emisji, już w latach 80. XX w. zaczęły powstawać pierwsze projekty jednostek morskich zasilanych LNG [Lindstad i in. 2020].

LNG (Liquefied Natural Gas) jest paliwem ekologicznym. Podczas procesu jego spalania wytwarza się około 15-20% mniej CO_2 niż w przypadku tradycyjnego paliwa statkowego. Wykorzystanie LNG na statkach może przyczynić się do ograniczenia emisji NO_x o 85-90% (jest to uzależnione od parametrów silnika) oraz prawie całkowitego ograniczenia emisji SO_x i cząstek stałych (PM) w stosunku do parametrów uzyskiwanych z wykorzystaniem paliw konwencjonalnych (o zawartości siarki do 1%) [Det Norske Veritas 2010; Pawlak 2013].

Skład paliwa LNG zdecydowanie różni się od parametrów ciężkich paliw okrętowych, gdyż zawiera śladowe ilości pierwiastków ciężkich. Skroplony gaz ziemny to czyste, bezbarwne paliwo, które nie wykazuje cech toksycznych, a także nie przyczynia się do powstawania korozji, co w przypadku transportu morskiego ma niezwykle istotne znaczenie.

Wykorzystywane obecnie w światowej flocie napędy oparte na LNG są bardzo zróżnicowane, producentami tych jednostek są m.in. Wärtsilä, Rolls-Royce, MAN Diesel oraz Mitsubishi Heavy Industries. Obecnie układy napędowe wykorzystujące paliwo LNG w większości funkcjonują jako hybrydy, łączące napęd tradycyjny oraz zasilanie na skroplony gaz ziemny. W eksploatacji są również silniki wspomagane energią elektryczną.

Efektywność napędu zależy nie tylko od jego typu, ale i zaawansowania technologicznego konkretnego rozwiązania. Poszczególne technologie napędowe różnią się od siebie przede wszystkim poziomem emisji poszczególnych związków, ale także sprawnością instalacji. Producenci rywalizują ze sobą, ulepszając swoje konstrukcje i z każdym nowym rozwiązaniem podnosząc ich efektywność. Należy jednak wskazać, że koszt zakupu statku napędzanego paliwem LNG jest wyższy o 10-15% od jednostek napędzanych w sposób tradycyjny. Uwzględniając koszty paliwa żeglugowego w dłuższej perspektywie, koszt ten zwraca się [Kuś 2015].

Armator TT-Line 7 marca 2022 r. odebrał swój pierwszy „zielony prom”. Jednostka zasilana jest alternatywnym paliwem LNG. Projekt tego nowoczesnego, przyjaznego ekologicznie statku został opracowany na podstawie Green Ship. Jest to prom o długości 230 m i 31 m szerokości, przeznaczony do przewozu 800 pasażerów i 200 jednostek towarowych na Morzu Bałtyckim. Wprowadzenie do eksploatacji tego nowoczesnego statku, wskazuje jak istotne jest podejmowanie działań w zakresie opracowywania nowych standardów dotyczących redukcji emisji szkodliwych związków dla statków eksploatowanych na Morzu Bałtyckim. Jednostka została wyposażona w silnik LNG od MAN Energy Solutions SE. Zastosowanie napędu LNG zmniejsza emisję szkodliwych związków do atmosfery. Zgodnie z przyjętymi założeniami projektowymi, emisja cząstek stałych zostanie zredukowana o 93%, CO₂ o 22% w porównaniu z paliwem żeglugowym MGO (Marine Gas Oil). Ponadto na GreenShip emisja tlenków siarki (SO_x) ma zostać ograniczona aż o 98%, a tlenków azotu (NO_x) o 82% w stosunku do tradycyjnego paliwa żeglugowego. Na statku dokonano także optymalizacji parametrów eksploatacyjnych statku, zwiększono pojemność ładunkową i pasażerską, co spowoduje maksymalne ograniczenie emisji na transportowaną jednostkę [Maliczewski 2022; Nasze nowe Zielone Statki...].

Napęd elektryczny

Uwzględniając obecny poziom rozwoju technologii oraz obowiązujące przepisy ograniczające emisje szkodliwych związków do atmosfery, jedynie napęd elektryczny możemy określić jako zeroemisyjny. W związku z potrzebą ograniczania szkodliwych emisji koniecznym stało się poszukiwanie rozwiązań, które nie tylko poprawiają ogólną wydajność statku, ale także ograniczą ślad węglowy. Obecna technologia pozwala na wykorzystanie napędu elektrycznego nie tylko jako zasilanie wspomagające, ale także jako głównej jednostki. Pod względem wymagań zrównoważonego rozwoju technologia ta jest bardzo przyjazna środowiskowo. Podczas eksploatacji silników elektrycznych nie ma emisji szkodliwych substancji do atmosfery, gdyż jedynym produktem powstającym w trakcie pracy jest ciepło. Coraz częściej statki morskie są wyposażone w dodatkowy silnik elektryczny. Wówczas instalacja działa w systemie hybrydowym wraz z konwencjonalną jednostką. Takie rozwiązanie zyskuje na popularności w przypadku statków obsługiwanych w portach, które stawiają na osiągnięcie zerowej emisji. To niezwykle istotna kwestia zgodna z ideą „zielonych portów”.

Przykładowo celem przewoźnika Stena Line jest ograniczenie emisji CO₂ o 30% do 2030 r., a do 2050 r. całkowite jej wyeliminowanie. Ten operator promowy prowadzi obecnie szereg działań, które mają na celu wprowadzenie do swojej floty jednostek całkowicie wolnych od paliw kopalnych. Przykładowo realizacja projektu Stena Elektra to modułowa koncepcja, która zakłada realizację kolejnych etapów skupionych wokół ograniczenia negatywnych emisji CO₂ [Almqvist 2021].

Obecnie produkowane napędy elektryczne są mało atrakcyjne dla armatorów ze względu na ich parametry środowiskowe. Ma to wpływ na zwiększające się zapotrzebowanie na wykorzystanie ich, także na statkach handlowych. Należy wskazać, że nowoczesne systemy nadwyżkę energii wykorzystują do obsługi systemów pomocniczych. Przewagą tego typu instalacji jest przestrzeń, która jest potrzebna do umieszczenia całości napędu. W porównaniu z napędem tradycyjnym jest ona o wiele mniejsza. Do zalet tej zeroemisyjnej instalacji należy także zaliczyć: lepszą manewrowość jednostki, większą elastyczność układu oraz ograniczenie hałasu [Forkiewicz, Wolski 2018].

Innowacyjnym rozwiązaniem w zakresie napędów elektrycznych jest Azipod firmy ABB. System ten został stworzony w 1990 r. we współpracy ze stoczną Kvaerner Masa-Yards w Finlandii. Jest to elektryczny układ napędowy o budowie obrotowej „gondoli”, która jest przymocowana do kadłuba statku od strony zewnętrznej. Zastosowanie tego napędu ma bezpośredni wpływ na poprawę efektywności operacyjnej statków, pozwala na ograniczenie zużycia energii o 5-15%, a gazów cieplarnianych aż o 25% w stosunku do tradycyjnego napędu. W wymiarze ekonomicznym olbrzymią zaletą wykorzystania tego napędu jest ograniczenie zużycia paliwa o 25%. Statek wyposażony w Azipod może osiągać większą prędkość przy mniejszej mocy. Ponadto jednostka jest bardziej zwrotna, generuje niższe natężenie hałasu, a dodatkowo napęd nie ogranicza w tak dużym stopniu, jak w przypadku napędów tradycyjnych, przestrzeni ładunkowej na statku. Rozwiązania technologiczne, takie jak Azipod, które wpływają na optymalizację parametrów eksploatacyjnych, zyskują w ostatnich latach na popularności (obecnie jest wykorzystywana na ponad 80 statkach). Należy wskazać, że rozwiązanie to może być wykorzystywane na różnych jednostkach, co wskazuje na uniwersalność prezentowanej technologii [ABB rozszerza linię... 2015; Elektryczne systemy napędowe...].

W zakresie wykorzystania napędu elektrycznego na statkach przoduje Stena Line. Armator posiada w swojej flocie jednostki o napędzie hybrydowym, ale planuje zakup jednostek, które będą zasilane wyłącznie energią elektryczną. Nowe jednostki to statki RoPax dostosowane do transportu pojazdów i pasażerów. Prom będzie miał długość 215 m, umożliwi przewóz od 1200 do 1500 pasażerów. Jednostka zostanie wyposażona w akumulatory o pojemności około 70 MWh, co pozwoli na realizację kursów na trasie Göteborg (Szwecja) – Frederikshavn (Dania), czyli na odległości 50 mil morskich. Pierwszy prom – Stena Electra zostanie oddany do eksploatacji najpóźniej do 2030 r. [Stena Electra – from...].

■ Analiza i ocena

Opisywane w trzeciej części rozwiązania techniczne poddane zostały analizie wielokryterialnej. Należy wskazać, że m.in. ze względu na nowatorskie rozwiązania, które dopiero zaczynają być wykorzystywane na statkach, występują bardzo duże ograniczenia w dostępności do materiałów technicznych. Oceny dokonano według kryteriów oraz punktacji zawartej w **tabeli 7.2**.

Tabela 7.2. Kryterium i skala oceny rozwiązań technicznych

Kryterium i skala oceny rozwiązań technicznych					
Kryterium	skala ocen z opisem				
	0	1	2	3	4
Stopień ograniczenia emisji szkodliwych substancji	nie ogranicza emisji	ogranicza emisję w małym stopniu	ogranicza emisję w stopniu umiarkowanym	ogranicza emisję w dużym stopniu	całkowicie eliminuje emisje
Ograniczenie zużycia paliwa konwencjonalnego	nie ogranicza spalania	ogranicza spalanie w niewielkim stopniu	ogranicza spalanie w stopniu umiarkowanym	ogranicza spalanie w dużym stopniu	całkowicie eliminuje spalanie
Ograniczenia związane z eksploatacją jednostki	ogranicza eksploatację w bardzo dużym stopniu	ogranicza eksploatację w dużym stopniu	ogranicza eksploatację w stopniu umiarkowanym	występują niewielkie ograniczenia eksploatacyjne	całkowity brak ograniczeń w eksploatacji
Stopień trudności wdrożenia na jednostkach w trakcie eksploatacji	niemożliwe	bardzo trudne	trudne	łatwe	bardzo łatwe
Bezpieczeństwo	stanowi bardzo duże zagrożenie dla statku i załogi	stanowi duże zagrożenie dla statku i załogi	stanowi niewielkie zagrożenie dla statku i załogi	nie stanowi zagrożenia dla statku i załogi	poprawia bezpieczeństwo na statku

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzona ocena uwzględniała szerokie spektrum prezentowanych rozwiązań. Została wykonana na podstawie wykonanego przeglądu literatury, materiałów uzyskanych od producentów, specjalistycznych serwisów branżowych oraz posiadanej wiedzy eksperckiej. Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawia **tabela 7.3**.

Tabela 7.3. Ocena ekspercka rozwiązań technicznych według przyjętej skali

Ocen rozwiązań technicznych według przyjętej skali							
Kryterium	Rotor Sail	eSAIL	WINGSAIL	Air Lubrification System	Skraber	napęd LNG	napęd elektryczny
Stopień ograniczenia emisji szkodliwych związków	3	3	3	2	3	3	4
Ograniczenie zużycia paliwa konwencjonalnego	2	3	3	2	0	3	4
Ograniczenia związane z eksploatacją jednostki	2	2	2	4	2	2	0
Stopień trudności wdrożenia na jednostkach w trakcie eksploatacji	3	3	3	2	2	2	1
Bezpieczeństwo	3	3	2	2	3	2	3
Ocena łączna	13	14	13	12	10	12	12

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza wykazała, że technologie wykorzystujące siłę wiatru eSAIL (łącznie 14 pkt.), WINGSAIL (13 pkt.) oraz Rotor Sail (13 pkt.) uzyskały sumarycznie najwyższe wskaźniki. Wysoka ocena punktowa wskazuje, że są to rozwiązania najbardziej uniwersalne. Należy wskazać, że systemy te pozwalają zarówno na osiągnięcie wymiernych korzyści w zakresie ochrony klimatu, jak i nie ograniczają w dużym stopniu parametrów eksploatacyjnych jednostki pływającej i mogą być wykorzystywane na skalę masową (co jest bardzo istotne dla armatorów). Najsłabiej w przeprowadzonej eksperckiej analizie wielokryterialnej wybranych technicznych rozwiązań na statkach morskich oceniono skrabery (płuczki paliwowe), które zmniejszają w dużym stopniu szkodliwe emisje, ale powodują zwiększenie zużycia paliwa i mogą powodować inne zanieczyszczenia, co wskazuje na ich ograniczenia w wymiarze środowiskowym.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania, których celem było zaprezentowanie i ocena wybranych rozwiązań technicznych na statkach morskich w kontekście ochrony klimatu z uwzględnieniem aspektów eksploatacyjnych wykazały, że obecnie wiele firm z branży morskiej pracuje nad tego typu rozwiązaniami i coraz częściej są one wykorzystywane w światowej flocie. Rozwój nowoczesnych technologii napędowych na statkach, które obejmują zarówno ekologiczne, jak i eksploatacyjne aspekty, stymuluje

powstawanie wielu nowych projektów w tym zakresie. Obecnie powstaje coraz więcej projektów (także koncepcyjnych) napędów. Duża skala oraz innowacyjność proponowanych rozwiązań wskazuje, że w niedalekiej przyszłości będziemy mieli do czynienia ze zdecydowaną eskalacją działań w zakresie niskoemisyjnych napędów wykorzystywanych na statkach morskich.

Przeprowadzone badania wykazały, że w obecnej sytuacji:

1. Technologiami przyszłości, które mają duże szanse na zaistnienie w światowej flocie na szerszą skalę, są rozwiązania wykorzystujące siłę wiatru. Bogatą ofertę w tym zakresie posiada przedsiębiorstwo Bound4blue, które oferuje systemy eSAIL i WINGSAIL. Rozwiązania te pozwalają na uzyskanie wymiernych korzyści w stosunku do napędów tradycyjnych, co przekłada się na ograniczenie szkodliwych emisji CO₂ średnio o 30%. Należy wskazać, że koncepcyjne rozwiązanie Orcelle Wind (dla statku typu Ro-Ro o długości 220 m i szerokość 40 m) zakłada ograniczenie emisję szkodliwych związków nawet o 90% w porównaniu z obecnie wykorzystywanymi napędami. Pod względem eksploatacyjnym, do wad tego typu rozwiązań należy zaliczyć m.in.: ograniczenie powierzchni ładunkowej statku, trudności w organizacji przeładunku, ograniczenie widoczności z mostka oraz uzależnienie trasy żeglugi od potencjału wiejącego wiatru w danym regionie.
2. Zaletą napędów wykorzystujących paliwo LNG jest ograniczenie zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery – CO₂ o 15-20%, tlenków azotu o 85-90% w stosunku do napędu tradycyjnego oraz niemalże całkowita eliminacja cząstek stałych i SO_x. Koszt budowy statku napędzanego LNG jest wyższy o około 10-15% w stosunku do rozwiązań tradycyjnych. Należy wskazać, że zbiorniki, które są niezbędne do przechowywania paliwa, znacznie ograniczają powierzchnię ładunkową jednostki. W przypadku przebudowy statku będącego w eksploatacji wymagane jest wprowadzenie szeregu zmian konstrukcyjnych. Bardzo istotnym aspektem, który może mieć wpływ na wykorzystanie napędu LNG na statkach, jest konieczność przygotowania odpowiedniego zaplecza technicznego w portach, które jest niezbędne do obsługi tego typu jednostek.
3. Wykorzystanie silników elektrycznych na statkach morskich jest rozwiązaniem, które pod względem środowiskowym niesie za sobą olbrzymie korzyści w kontekście minimalizacji emisji szkodliwych związków. W aspekcie eksploatacyjnym dużą wadą tego napędu jest krótki zasięg i ograniczona moc silnika. Należy zauważyć, że silniki elektryczne wykorzystywane są często jako napęd dodatkowy, który uruchamiany jest w portach, w obszarach specjalnie chronionych pod względem emisji. Należy także wskazać, że bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju zrównoważonego jest to, w jaki sposób wytwarzana jest energia elektryczna. W przypadku krajów skandynawskich, gdzie energia pochodzi przede wszystkim ze źródeł odnawialnych, to rozwiązanie pod względem ekologicznym jest korzystniejsze w stosunku do krajów, gdzie podstawę dla przemysłu energetycznego stanowią paliwa kopalne.
4. Poszukiwanie i wprowadzenie innowacyjnych, ekologicznych rozwiązań na statkach morskich jest bardzo istotne dla statków pływających w obszarach specjalnych, takich jak Morze Bałtyckie. Uwzględniając aspekty środowiskowe oraz obecną sytuację na rynku paliw, z pewnością armatorzy będą poszukiwać technologii, która najlepiej wpisze się w obecne trendy. Należy wskazać, że w najbliższych latach w zakresie transportu morskiego może pojawić się koncepcja wykorzystania czystego wodoru.

Literatura:

- ABB rozszerza linię napędów Azipod, aby poprawić elastyczność i niezawodność w sektorze żeglugi 2015. <https://new.abb.com/news/pl/detail/27520/abb-rozszerza-linie-napedow-azipod-aby-poprawic-elastycznosc-i-niezawodnosc-w-sektorze-zeglugi> (dostęp w dn.: 3.03.2022).
- Air-Lubrication system reduces CO₂ emission by 6% 2012. https://officerofthewatch.com/2012/07/12/air-lubrication-system/?fbclid=IwAR1D0Zd86DcAJ1HUqQbZ75iqClkidxKRuU_MJltXgBpccSYyWdbhXu-6UjbE (dostęp w dn. 20.01.2023).
- Almqvist P. 2021. Stena Line challenges the shipping industry – by going electric. <https://www.stenaline.com/media/stories/stena-line-challenges-the-shipping-industry-by-going-electric/> (dostęp w dn.: 3.03.2022).
- Bertram V. 2019. 4 th Hull Performance & Insight Conference HullPIC'19 Gubbio, 6-8 May. bound4blue to equip Amasus' general cargo ship with eSAIL. <https://www.offshore-energy.biz/bound4blue-to-equip-amasus-general-cargo-ship-with-esail/?fbclid=IwAR2vc-k40iUP722qsoj0CUX0l-3RzyHDz0SpY2N4gmW88wiKREq5Ilsfk5ow> (dostęp 10.01.2023).
- Deja A., Ulewicz r., Kyrychenko Y. 2021(a). Analysis and assessment of environmental threats in maritime transport. *Transportation Research Procedia*, 1073-1080.
- Deja A., Kaup M., Gróbarczyk M., Ślęczka W. 2021(b). Use of the Port Community System in Sustainable Ship-Generated Waste Management. *European Research Studies Journal* Volume XXIV Issue 2B.
- Det Norske Veritas 2010. Greener Shipping in the Baltic Sea. Norway.
- Elektryczne systemy napędowe Azipod produkcji ABB zmniejszają zużycie paliwa aż o 25%. <https://new.abb.com/pl/o-nas/technologie/technologie-abb-ktore-zmieniły-swiat/naped-dla-statkow> (dostęp w dn.: 02.03.2022).
- Enabling global trade, leading positive change, 2021 Annual report. <http://www.clarksons.com/media/a5aaskdb/clarksons-annual-report-2021.pdf#page=74> (dostęp w dn.:29.03.2022).
- Endres S., Maes F., Hopkins F., Houghton K., Mårtensson Eva M., Oeffner J., Quack B., Singh P., Turner D. 2018. A New Perspective at the Ship-Air-Sea-Interface. The Environmental Impacts of Exhaust Gas Scrubber Discharge. *Front. Mar. Sci.*, 24. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00139> (dostęp w dn.: 3.03.2022).
- EU. 2020. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A New Industrial Strategy for Europe, Brussels. COM/2020/102 final.
- European Maritime Transport Environmental Report 2021. European Maritime Safety Agency (EMSA).
- Forkiewicz M., Wolski L. 2018. Elektryczne promy morskie na przykładzie Norwegii. *Autobusy*, DOI: 10.24136/atest.2018.519.
- Global Average Bunker Price 2022. <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price> (dostęp w dn.: 30.03.2022).
- Green Port – der Hamburger Hafen setzt auf Nachhaltigkeit, <https://marketing.hamburg.de/greenport-hamburg.html> (dostęp w dn.: 02.03.2022).
- Kuś P. 2015. Ekologiczne napędy przyszłości (cz. 1): LNG. <https://www.gospodarkamorska.pl/porty-logistyka-ekologiczne-napedy-przyszlosci-cz-lng-12338> (dostęp w dn.: 02.03.2022).
- Lindstad E., Eskeland Gunnar S., Riialand A., Valland A. 2012. Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. *Sustainability* 2020. MDPI, Lloyd's Register, vol. 12(21).
- Maliszewski J. 2022. TT-Line odebrało nowy zielony prom. <https://www.gospodarkamorska.pl/tt-line-odebralo-nowy-zielony-prom-63029> (dostęp w dn.08.03.2022).
- MarineTraffic:Vessels Database. 2022. https://www.marinetraffic.com/en/data/?asset_type=vessels&columns=flag,shipname,photo,recognized_next_port,reported_eta,reported_destination,cu-

urrent_port,imo,ship_type,show_on_live_map,time_of_latest_position,lat_of_latest_position,lon_of_latest_position,notes (dostęp w dn.: 30.03.2022).

MEPC.1/Circ.684, 17 August 2009, Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), IMO 2009. https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/MEPC.1_Circ.684_Guidelines%20for%20Voluntary%20use%20of%20EEOI.pdf.

MSC Orders More Than 30 Silverstream System To Cut Up To 1.6 Million Tonnes Of Carbon Emissions.2021. <https://www.marineinsight.com/shipping-news/msc-orders-more-than-30-silverstream-system-to-cut-up-to-1-6-million-tonnes-of-carbon-emissions/>.

Midor K., Klimecka-Tatar D.; Chybowski L. 2017. Innowacje w przemyśle: wybrane aspekty, Gliwice. Mikuła T. 2017. Okrętowe silniki tłokowe – ekologiczne i ekonomiczne rozwiązania techniczne. Autobusy: Technika, eksploatacja, systemy transportowe. Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium.

Myśków J. 2017. Współczesne technologie ograniczenia emisji SO_x i NO_x w strefie ECA. Prezentacja z seminarium zamykającego projekt BSR INNOSHIP, 06.09.2013.

Nasze nowe Zielone Statki (Green Ships). <https://www.ttline.com/pl/tt-line/green-ship/> (dostęp w dn.: 30.03.2022).

Norsepower Rotor Sail, <https://www.norsepower.com/technology> (dostęp w dn.26.11.2021).

Nowicki J., Polasz S. 2016. Analiza stosowanych rozwiązań technicznych zmniejszających emisje NO_x oraz SO_x w aspekcie dyrektywy siarkowej (Konwencja MARPOL). Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny.

Orcelle Wind – introducing the world’s first wind-powered RoRo vessel, <https://www.walleniuswilhelmsen.com/news-and-insights/highlighted-topics/orcelle>.

Pawlak M. 2013. Zastosowanie LNG do napędu statków celem ograniczenia emisji toksycznych składników spalin jednostek pływających w rejonie Morza Bałtyckiego. Technika Transportu Szybowego, 10. Perational Vessels. 2022. <https://www.silverstream-tech.com/operational-vessels/> (dostęp w dn.: 28.03.2022).

Poskrobko B. 2009. Zrównoważony rozwój gospodarki opartej na wiedzy. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Białymstoku, Białystok.

Prevention of Air Pollution from Ships. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx> (dostęp w dn.: 30.03.2022).

Przepisy nadzoru konwencyjnego statków morskich. Część IX Ochrona Środowiska. 2022. Część IX, Ochrona Środowiska, Polski Rejestr Statków.

Report of the World Commission on Environment and Development 1987. Our Common Future. United Nations.

Resolution MEPC.304(72) 2018. Initial Imo Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, MEPC 72/17/Add.1, Annex 11, page 1.

Restructuring the maritime transportation industry 2007. Global overview of sustainable development practices Transportation Systems, Québec.

Rotor Sail technology – Cut fuel consumption by up to 30%. https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/energy-saving-technology/rotor-sail?fbclid=IwAR16PwJBVB4E1L_ZV-DIb7-ZKI608s9gqPmpRVs9G5UGwt70iugt2NrNZaDQ (dostęp 10.01.2023).

Sethi S. 2021, Marine TechnologyA Guide To Scrubber System On Ship. <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/> (dostęp w dn.: 30.03.2022).

Stena Elektra – from vision to vessel. <https://www.stenaline.com/stena-elektra-from-vision-to-vessel> (dostęp w dn.: 30.03.2022).

Szymonowicz J. 2022. Ocena wybranych technicznych rozwiązań na statkach morskich w kontekście zrównoważonego rozwoju transportu. Praca inżynierska napisana pod kierunkiem dr inż. Agnieszki Dei, Akademia Morska w Szczecinie.

The Oceanbird concept. <https://www.theoceanbird.com/the-oceanbird-concept/?fbclid=IwAR0NM-Rq0LMw9S9U7kLvi92jSTQuwA8G2Q9CyAjLn9SSFkh2b6Q0RejvfnQ> (dostęp w dn.: 11.01.2023).

Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development sustainabledevelopment.un.org A/RES/70/1, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, United Nations, 21 October 2015. <https://documents-ddsny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>.

Understanding exhaust gas treatment systems 2012. Guidance for shipowners and operators.

What is Air Lubrication? <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/> (dostęp w dn.: 02.01.2022).

Wymagania IMO dotyczące redukcji zawartości siarki w paliwie żeglugowym- co należy wiedzieć, 2018. <https://www.prs.pl/aktualnosci/2018/wymagania-imo-dotyczace-redukcji-zawartosci-siarki-w-paliwie-zeglugowym-co-nalezzy-wiedziec>.

Wingsail's Operational Principle. <https://bound4blue.com/en/wingsail> (dostęp w dn.: 02.02.2022).

Rigid sails for vessels. <https://bound4blue.com> (dostęp w dn.: 02.02.2022).

Wysocki J. 2017. Analiza eksploatacyjnego wskaźnika efektywności energetycznej statku w aspekcie ekonomicznym i ekologicznym. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 100/2017, 200-213.

Żukowska S., Palmowski T., Połom M. 2021. Koncepcja zielonego portu w działaniach strategicznych polskich portów morskich. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG 24(3), 49-63, DOI 10.4467/2543859XPKG.21.018.15045.

Materiał informacyjny

Zintegrowany System Obserwacji Węgla w Europie – polski udział w sieci badawczej

prof. dr hab. Janusz Olejnik¹

dr inż. Krystian Szczepański²

dr inż. Klaudia Ziemblińska¹

¹Pracownia Meteorologii, Katedra Budownictwa i Geoinżynierii, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu;

²Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy

Wstęp

Sieć badawcza Zintegrowanego Systemu Obserwacji Węgla (ICOS), która w październiku 2015 r. uzyskała status Konsorcjum Europejskiej Infrastruktury Badawczej (ERIC), powstała w wyniku starań środowisk naukowych wielu krajów w Europie. Postanowiły one bowiem przekształcić dotychczas realizowane swoje działania projektowe we wspólną długoterminową współpracę. W swojej obecnej formie sieć ICOS zrzesza 149 stacji z aż 14 krajów europejskich, w których prowadzone są ciągłe pomiary stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze i ich przepływy pomiędzy ekosystemami lądowymi i morskimi. W ramach projektu ICOS są prowadzone precyzyjne pomiary, dokonywane w sposób ustandaryzowany, wykorzystując najnowsze dostępne techniki pomiarowe przez długi okres. Uzyskane w ramach sieci ICOS dane spełniają wymagania zasad FAIR (dostępne, interoperacyjne i wielokrotnego użytku) i są bezpłatnie udostępniane za pośrednictwem tzw. Carbon Portalu [Friedlingstein i in. 2022]. Naukowcom z różnych dziedzin mają m.in. ułatwić lepsze zrozumienie wzajemnych interakcji pomiędzy zmieniającym się klimatem a różnymi typami ekosystemów naturalnych, jak również tymi wytworzonymi przez człowieka (miasta). Co istotne, w ramach projektu ICOS prowadzone są również prace nad konkretnymi, gotowymi produktami i usługami klimatycznymi tworzonymi na podstawie pozyskanych danych, mające na celu wsparcie decydentów w ich

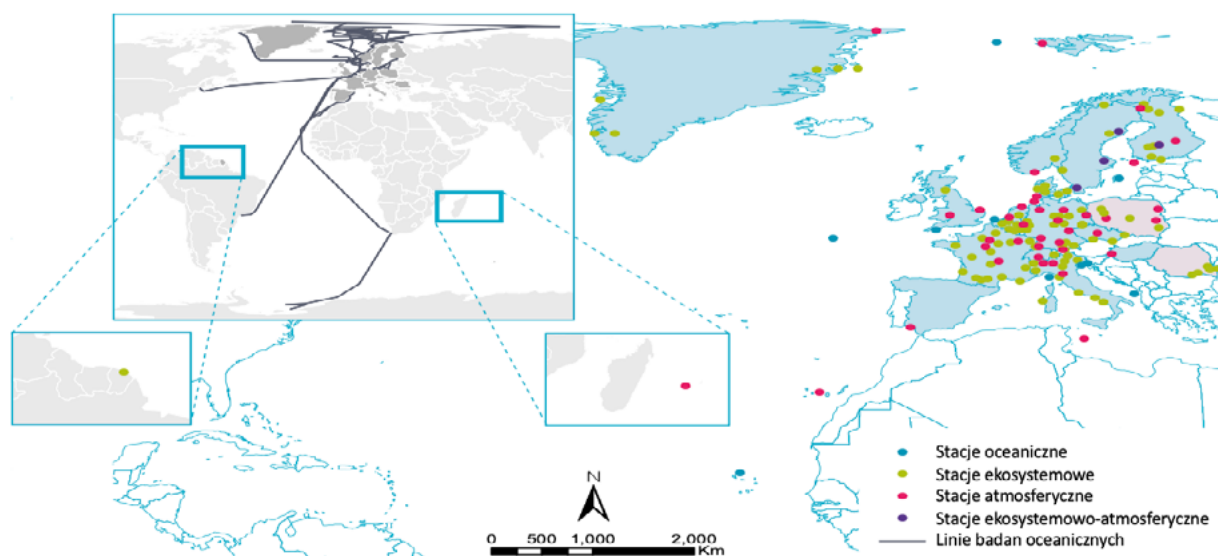
działaniach na rzecz ochrony klimatu [Kutsch i in. 2022]. Tym samym dane z ICOS mają olbrzymie znaczenie nie tylko z uwagi na poszerzanie światowej bazy różnorodnych badań środowiska, ale także są bardzo istotne dla planowania, wdrażania i oceny polityki klimatycznej na szczeblu krajowym i międzynarodowym.

Struktura i znaczenie badań realizowanych w sieci ICOS na arenie międzynarodowej

Stacje sieci ICOS są z założenia obsługiwane i finansowane indywidualnie na szczeblu krajowym. Dodatkowo utworzono trzy wspólne Centra Tematyczne ds. Atmosfery, Ekosystemu i Oceanu oraz Centralne Laboratoria Analityczne, których zadaniem jest wspieranie wszystkich stacji w ich działalności w sposób ciągły, dostarczając protokoły pomiarowe zatwierdzone na szczeblu międzynarodowym, szczegółowe analizy i materiały kalibracyjne, a także szkolenia dla operatorów i wiele innych. Badacze odpowiedzialni za stacje pomiarowe (Principal Investigators (PI)) wchodzi w skład tzw. Zespołu Stacji Monitoringowych, wspólnie rozwijając i udoskonalać naukowe i techniczne podstawy funkcjonowania sieci [ICOS RI 2020]. W ramach ICOS wspólne działania obejmują wszystkie zrzeszone kraje, będąc załącznikiem nie tylko współpracy naukowej, ale również platformą dla rozwoju innowacyjnych metod badawczych. Siedziba główna ICOS znajduje się w Helsinkach w Finlandii. Podstawowymi zadaniami jej przedstawicieli jest koordynacja działań całej sieci przy zapewnieniu wsparcia administracyjnego, w tym zarówno z zakresu pozyskiwania środków finansowych, komunikacji, jak i współpracy międzynarodowej i międzyprojektowej.

Przystąpienie każdego nowego kraju do ICOS ERIC umacnia sieć pod względem efektywności ponoszonych kosztów, doskonałości naukowej, a także znaczenia społecznego. Łączenie działań w placówkach centralnych, stosowanie wspólnych standardów oraz scentralizowane przetwarzanie danych zapewnia efektywne wykorzystanie wytworzonych w ICOS produktów [ICOS RI 2022]. Zróżnicowanie geograficzne, topologiczne i biologiczne stacji w sieci ICOS gwarantuje, że dostarczane dane są reprezentatywne dla całego kontynentu europejskiego. Instytucje obsługujące stacje na szczeblu krajowym są niejednokrotnie podstawą budowania konsorcjów ubiegających się z sukcesem o europejskie fundusze badawcze, takie jak Horyzont 2020 lub Horyzont Europa. Od 2015 r. ICOS i jego organizacje partnerskie są zaangażowane już w ponad 20 takich projektów. Dla przykładu w 2021 r. ICOS rozpoczął koordynację projektu PAUL (pomiar gazów cieplarnianych w środowiskach miejskich, budżet 13 mln EUR), a w drugiej połowie 2022 r. koordynację projektu KADI (studium koncepcyjne infrastruktury badawczej świadczącej usługi klimatyczne w Afryce).

Obecne rozmieszczenie stacji pomiarowych oraz tras badawczych na morzach i oceanach wchodzących w skład sieci ICOS przedstawiono na **rysunku 1**.

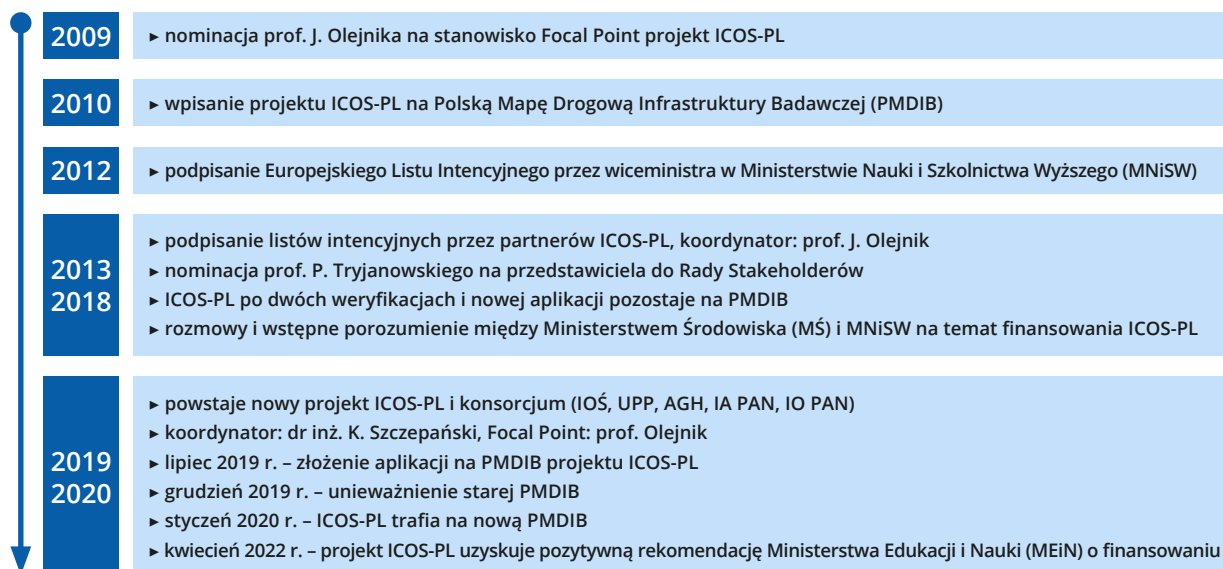


Źródło: oficjalne materiały przekazane przez Dyrektora Generalnego projektu ICOS.

Rysunek 1. Rozmieszczenie stacji badawczych ICOS. Kraje w kolorze jasnoróżowym nie są jeszcze członkami ICOS

Historia i struktura projektu ICOS–Polska

Od kilkunastu lat również w Polsce trwają negocjacje z różnymi jednostkami administracji rządowej, obecnie z Ministerstwem Klimatu i Środowiska (MKŚ) i Ministerstwem Edukacji i Nauki (MEiN), o sfinansowanie i wejście naszego kraju do infrastruktury ICOS. Krótki opis historii tych negocjacji przedstawiano na **rysunku 2**.



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2. Syntetyczne historia aktywności projektu ICOS–Polska (ICOS–PL), które miały doprowadzić do włączenia Polski do Europejskiej struktury badawczej ICOS

Ze względu na unieważnienie starej Polskiej Mapy Drogowej Infrastruktury Badawczej (PMDIB) w 2019 r. powołano nowe konsorcjum zrzeszające jednostki deklarujące poparcie dla inicjatywy budowy sieci pomiarów ICOS-PL, dysponujące odpowiednim zapleczem technicznym i wykwalifikowaną kadrą naukową, doświadczoną w prowadzeniu badań w tym zakresie [Egli i in. 2021; Olejnik i Małek 2020; Stokowski i in. 2021; Wąs i in. 2021; Ziemblińska i in. 2018; Zimnoch i in. 2018]. Liderem konsorcjum został Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy (IOŚ). W skład nowego konsorcjum wchodzi: Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (UPP), Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (AGH), Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (IO PAN) oraz Instytut Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk (IA PAN) oraz Uniwersytet Rolniczy w Krakowie (URK). Strukturę proponowanej sieci ICOS-PL przedstawia **tabela**.

Tabela. Planowana sieć stacji badawczych w ramach projektu ICOS-PL

Nazwa stacji	Typ stacji	Typ obiektu badawczego	Klasa stacji	Instytucja prowadząca badania
ATM Wschód	atmosferyczna	wysoka wieża	klasa 1	AGH
ATM Zachód	atmosferyczna	wysoka wieża	klasa 2	AGH
Białystok	atmosferyczna	wysoka wieża	klasa 2	IOŚ-PIB
Chmiel	ekosystemowa	ekosystem rolniczy	klasa 2	IA PAN
Kraków	ekosystemowa	miasto	klasa 2	AGH
Mężyk	ekosystemowa	las	klasa 2	UPP
Pomerania	oceaniczna	statek	klasa 2	IO PAN
Rzecin	ekosystemowa	torfowisko	klasa 1	UPP

Źródło: Opracowanie własne.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Mimo tych wieloletnich starań konsorcjum ICOS-PL o zdobycie finansowania w naszym kraju, Polska nadal nie przystąpiła do europejskiej sieci badawczej ICOS. Włączenie naszego kraju do tej międzynarodowej struktury wydaje się być bezsporne i niezwykle ważne, co od wielu lat deklarują również jej koordynatorzy. Istnieją aż trzy grupy powodów, dla których Polska powinna wziąć udział w tym ogólnoeuropejskim naukowym przedsięwzięciu badawczym. Należą do nich:

1. argumenty naukowe:
 - rozwój nowoczesnych badań nad zmianami globalnymi i klimatu w Polsce,
 - ocena wymiany gazów szklarniowych między powierzchnią Polski a atmosferą,
 - integracja środowisk naukowych w kraju oraz w ramach Europejskiej Przestrzeni Badawczej,
 - rozwój nowoczesnych technologii i metod badawczych;

2. argumenty edukacyjne:

- infrastruktura ICOS-PL jako element edukacji ekologicznej dotyczącej wpływu działalności człowieka na środowisko przyrodnicze i procesy zachodzące w atmosferze;

3. argumenty polityczno-gospodarcze:

- darmowy dostęp do danych wszystkich państw członkowskich struktury ICOS,
- tworzenie podstaw do kształtowania długofalowej polityki ochrony klimatu w Polsce i Europie,
- Komisja Europejska (KE) zakłada, że dane z ICOS będą stanowić podstawę do oszacowania i weryfikacji bilansu CO₂ dla krajów Unii (darmowe świadectwa emisyjne, zielony węgiel, system KASHUE),
- legitymizacja pozytywnych efektów polityki klimatycznej Polski w opinii KE w tym redukcji emisji CO₂.

W kwietniu 2022 r. ICOS-PL uzyskał już pozytywną opinię i rekomendację komisji przy MEiN na finansowanie 50% kosztów przeznaczonych na utworzenie i uruchomienie sieci ICOS-PL (około 30 mln PLN). Nadal są prowadzone negocjacje o pozostałe środki na utrzymanie sieci stacji oraz koszty udziału w europejskiej strukturze ICOS do 2035 r., co uniemożliwia rozpoczęcie działań projektu ICOS-PL.

Literatura:

Egli M., Bösiger M., Lamorski K., Sławiński C., Plötze M., Wiesenberg G.L.B., Tikhomirov D. Musso A., Hsu S.-Y., & Raimondi S. (2021). Pedogenesis and carbon sequestration in transformed agricultural soils of Sicily. *Geoderma*, 402, 115355, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115355> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M., Andrew r. M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson r.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Croni, M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely r.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton r.A., Hurtt G C., Iida Y., Ilyina T., Luijkx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S. K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.I., Niwa Y. Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian r., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof r., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. 2022. Global Carbon Budget 2021, *Earth System Science Data*, 14, 1917-2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

ICOS RI. 2022. ICOS RI Annual Report 2021. https://www.icos-cp.eu/sites/default/files/2022-05/ICOS%20Annual%20Report%202021_0.pdf (dostęp w dn.: 01.10.2022).

ICOS RI. 2020. ICOS Handbook 2020. <https://www.icos-cp.eu/sites/default/files/cmis/ICOS%20Handbook%202020.pdf> (dostęp w dn.: 01.10.2022).

Kutsch W., Ciais P., Becker M., Cantoni C., Cristofanelli P., Delmotte M., Denier van der Gon H., Droste A., Gerosa G., Gkritzalis T., Gielen B., Holst J., Kubistin D., Luchetta A., Ramonet M., Rehder G., Rutgeresson A., Steinbacher M., Super I. 2022. Are Carbon Sinks at Risk? FLUXES – The European

Greenhouse Gas Bulletin, Volume 1, June 2022. ICOS ERIC, <https://doi.org/10.18160/8NKQ-65S1> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

Olejniki J., Małek S. 2020. Rola lasu w pochłanianiu dwutlenku węgla z atmosfery. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Stokowski M., Winogradow A., Szymczycha B., Carstensen J., Kuliński K. 2021. The CO₂ system dynamics in the vicinity of the Vistula River mouth (the southern Baltic Sea): A baseline investigation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 258, 107444, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107444> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

Wąs A., Krupin V., Kobus P., Witajewski-Baltvilks J., Jeszke r., Szczepański K. 2021. Towards Climate Neutrality in Poland by 2050: Assessment of Policy Implications in the Farm Sector. *Energies*, 14, 7595, <https://doi.org/10.3390/en14227595> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

Ziemlińska K., Urbaniak M., Merbold L., Black T.A., Jagodziński A.M., Herbst M., Qiu C., Olejnik J. 2018. The carbon balance of a Scots pine forest following severe windthrow: Comparison of reforestation techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 216-228, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.012> (dostęp w dn.: 26.10.2022).

Zimnoch M., Necki J., Chmura L., Jasek A., Jelen D., Galkowski M., Kuc T., Gorczyca Z., Bartyzel J., Rozanski K. 2018. Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(6), 1051-1071, <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9821-0> (dostęp w dn.: 26.10.2022).



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

