

# Konteksty dekarbonizacji przemysłów energochłonnych



# Konteksty dekarbonizacji przemysłów energochłonnych



**Instrat Policy Paper 05/2023**

Jarosław Kopec

Michał Kulbacki

Stanisław Stefaniak

Michał Hetmański

Warszawa, listopad 2023

**Rekomendujemy cytowanie:**

Kopeć J., Kulbacki M., Stefaniak S.,  
Hetmański M. (2023).  
*Konteksty dekarbonizacji  
przemysłów energochłonnych.*  
Instrat Policy Paper 05/2023.

**Autorstwo:**

Jarosław Kopeć  
Michał Kulbacki  
Stanisław Stefaniak  
Michał Hetmański

**Kontakt:**

Stanisław Stefaniak  
stanislaw.stefaniak@instrat.pl

**Projekt okładki i skład:**

Anna Olczak

**Redakcja:**

Julia Zaleska

Treść publikacji oraz modelu  
makroekonomicznego dostępne na licencji:  
Creative Commons Attribution 4.0 International  
(CC BY 4.0).



Niniejsza publikacja powstała przy wsparciu  
Europejskiej Fundacji Klimatycznej (ECF).

Publikacja dostępna jest do pobrania  
pod adresem: [www.instrat.pl/konteksty-  
dekarbonizacji-przemyslow-energochlonych/](http://www.instrat.pl/konteksty-dekarbonizacji-przemyslow-energochlonych/)

Model makroekonomiczny zaprezentowany  
w rozdziale 4 dostępny jest do pobrania pod  
adresem:

[https://www.link.instrat.pl/model\\_przemyslowy](https://www.link.instrat.pl/model_przemyslowy)

Wszelkie błędy są nasze.  
Stosuje się zwyczajowe zastrzeżenia.

Instrat Policy Paper 05/2023

Warszawa, listopad 2023

ISBN: 978-83-967509-8-3

# Spis treści

<b>Kluczowe liczby i wnioski</b>	4
<b>1. Wprowadzenie</b>	6
1.1. Kontekst polityczny i regulacyjny	8
1.2. Kontekst technologiczny	15
1.3. Kontekst regionalny	19
1.4. Kontekst finansowy	22
<b>2. Zużycie energii, paliw i emisje gazów cieplarnianych w sektorach energochłonnych</b>	25
<b>3. Studia przypadków – dekarbonizacja produkcji cementu i stali</b>	31
3.1. Pas Cementu	31
3.2. Ścieżki dekarbonizacji stali	37
<b>4. Zielony szok inwestycyjny – modelowanie efektów makroekonomicznych</b>	45
4.1. Założenia modelowania i dane wejściowe	45
4.2. Pozytywny szok inwestycyjny – jak zwiększenie inwestycji w transformację energetyczną wpłynie na polską gospodarkę i sektory energochłonne	47
4.3. Ścieżki dekarbonizacji – wyniki modelowania scenariuszy redukcji emisji do 2050 r.	50
<b>Bibliografia</b>	53
<b>Aneks. Metodologia modelu makroekonomicznego przedstawionego w rozdziale 4</b>	58

# Kluczowe liczby i wnioski



**47 mln**  
ton CO<sub>2</sub>

za tyle emisji odpowiadały w 2021 r. cztery najważniejsze sektory energochłonne (produkcja metali, produkcja cementu, sektor chemiczny oraz rafinacji ropy i produkcji koksu). To 81% emisji przemysłowych oraz 15% wszystkich emisji CO<sub>2</sub> w Polsce.



**27%**

nawet za tyle wszystkich przemysłowych emisji CO<sub>2</sub> odpowiadają cementownie w województwach leżących w tzw. Pasie Cementu na południu Polski, gdzie koncentruje się jego produkcja.



**50%**

taki mniej więcej jest udział stali wtórnej przetapianej ze złomu w całkowitej produkcji stali w Polsce. Druga połowa produkowana jest w wysokoemisyjnym procesie wytopu w piecach tlenowych.

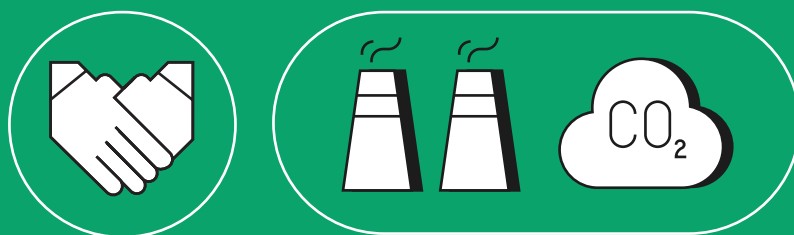


**3 tys.**  
nowych miejsc pracy

o tyle może wzrosnąć zatrudnienie w sektorach energochłonnych do 2050 r. w scenariuszu zielonego szoku inwestycyjnego – zwiększonych inwestycji w transformację energetyczną.

- Dekarbonizacja każdej branży przemysłu energochłonnego wiąże się ze specyficznymi i odmiennymi wyzwaniami. Dla większości z branż energochłonnych dostępne są też różne rozwiązania technologiczne (elektryfikacja, wykorzystanie wodoru, technologii CCS lub wprowadzenie zmian w procesie produkcji). To, która z dostępnych możliwości technologicznych będzie optymalna dla danego sektora, zależy w równie dużej mierze od decyzji inwestorów, co od publicznych systemów wsparcia dla tych technologii i aktywnej polityki przemysłowej państwa, kształtujących warunki inwestycyjne.
- Państwa zachodnie prowadzą obecnie intensywną zieloną politykę przemysłową, konkurując w subsydiowaniu krajowej produkcji kluczowych niskoemisyjnych technologii. Konieczne jest jednak również uwzględnienie w niej tradycyjnych, energochłonnych sektorów przemysłu. Przyjmowane przez polski rząd strategiczne plany rozwoju określonych technologii lub wsparcia przemysłu w ogóle, powinny zostać uzupełnione o strategię sektorowe, odpowiadające na odmiennie wyzwania każdej z energochłonnych branż. Stawką jest nie tylko osiągnięcie neutralności klimatycznej gospodarki, ale też zapewnienie jej konkurencyjności.

- Transformacja energetyczna nie oznacza zapaści przemysłu. Wręcz przeciwnie – wyniki modelowania ekonomicznego sugerują, że w scenariuszu zwiększonych nakładów na transformację, zarówno zatrudnienie, jak i wartość dodana w sektorach energochłonnych utrzymają się na stabilnym poziomie (a zatrudnienie wzrasta o 1%).
- Dekarbonizacja przemysłów energochłonnych może przynieść również negatywne konsekwencje w regionach wysokoemisyjnych. Dotyczy to relokacji na północ Polski, zlokalizowanych obecnie głównie na południu kraju, zakładów produkcyjnych. W związku z tym konieczne jest objęcie polskich regionów przemysłowych Funduszem Sprawiedliwej Transformacji w kolejnej unijnej perspektywie budżetowej. Rząd i samorzady powinny opracować, analogicznie jak dla regionów górniczych, instrumenty wsparcia i programy niwelujące negatywne konsekwencje społeczne i środowiskowe relokacji przemysłu.
- Dekarbonizacja przemysłu wiąże się ze znacznymi nakładami inwestycyjnymi. Część tych środków, zwłaszcza dla innowacyjnych technologii, trzeba uzyskać nie tylko od inwestorów prywatnych, ale również z krajowych i unijnych środków publicznych. Branże energochłonne mogą jednak zwiększyć swój dostęp do prywatnego kapitału, przyjmując ambitne i rzetelne strategie dekarbonizacji, gwarantujące inwestorom, że dany podmiot pozostanie konkurencyjny w nowej, niskoemisyjnej gospodarce.



# 1. Wprowadzenie

Transformacja polskiej gospodarki w stronę neutralności klimatycznej nie odbędzie się bez dekarbonizacji przemysłu. Dla tego procesu najistotniejsza jest dekarbonizacja czterech najbardziej energochłonnych przemysłów w kraju:

- produkcji cementu,
- produkcji metali,
- sektora chemicznego,
- rafinacji ropy naftowej i produkcji koksu.

Te cztery sektory odpowiadały w 2021 r. za 81% emisji z wytwórstwa przemysłowego w Polsce i 15% wszystkich emisji CO<sub>2</sub> z polskiej gospodarki, z uwzględnieniem gospodarstw domowych<sup>1</sup>. Poza dużym wpływem na klimat, przemysły energochłonne mają też istotne znaczenie ekonomiczne. Odpowiadają one za znaczną część PKB i dostarczają produkty, które stanowią podstawy bardziej złożonych procesów produkcyjnych.

Dekarbonizacja przemysłów energochłonnych wiąże się z szeregiem wyzwań dla polskiej gospodarki. Państwa zachodnie już teraz prowadzą aktywną, zieloną politykę przemysłową wspierającą rozwój bezemisyjnych technologii, takich jak produkcja wodoru, produkcja technologii energii odnawialnej i baterii czy wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub>. Od dostępności i kosztów tych technologii zależy w dużej mierze powodzenie dekarbonizacji branż energochłonnych.

Branże energochłonne, mimo że nie są głównym celem nowej, zielonej polityki przemysłowej, w ostatnim czasie również stały się adresatami wsparcia publicznego w związku z rosnącymi kosztami energii. Odpowiednio prowadzona dekarbonizacja tych przemysłów, połączona z rozwojem technologii niskoemisyjnych i zwiększeniem ich dostępności dla biznesu, pozwoli na ograniczenie emisji z przemysłów energochłonnych oraz zapewni im długoterminową konkurencyjność.

**W niniejszym raporcie chcemy pokazać złożone konteksty, w jakich należy rozpatrywać dekarbonizację przemysłu energochłonnego. Wyzwanie to należy rozpatrywać na kilku płaszczyznach: polityczno-regulacyjnej, technologicznej, regionalnej i finansowej.**

---

<sup>1</sup> Definicje sektorów energochłonnych oraz informacje na temat źródeł danych o ich emisjach zostały opisane w nocie terminologicznej i metodologicznej.



## Nota terminologiczna i metodologiczna

Pojęcia „przemysł” i „przemysł wytwórczy” używane w tym opracowaniu odwołują się do działalności ujętej w Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD), sekcja C – przetwórstwo przemysłowe.

Przemysły energochłonne odpowiadają następującym działom z sekcji C PKD:

- **PKD 23 – produkcja wyrobów z pozostałych mineralnych surowców niemetalicznych.**

W ramach tego działu produkcję cementu ujęto, wraz z wapnem i gipsem, w grupie 23.5. Produkcja cementu, wapna i gipsu.

- **PKD 24 – produkcja metali.**

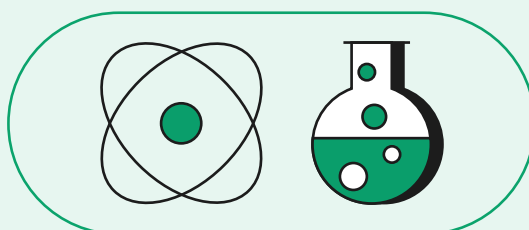
W ramach tego działu produkcja stali, której poświęcamy część rozdziału 3, ujęta jest w grupie 24.1. Produkcja surówki, żelazostopów, żeliwa i stali oraz wyrobów hutniczych.

- **PKD 20 – produkcja chemikaliów i wyrobów chemicznych.**

- **PKD 19 – wytwarzanie i przetwarzanie koksu i produktów rafinacji ropy naftowej.**

W dalszej części opracowania analiza jest prowadzona w większości na poziomie wyżej wskazanych czterech działów PKD (19, 20, 23 i 24). Tam, gdzie jest to uzasadnione i gdzie pozwala na to dostępność danych, używamy danych z poziomu podgrup PKD: w rozdziale 3.1. z podgrupy 23.5. obejmującej cement (łącznie z produkcją wapna i gipsu, jednak nie wpływa to znacząco na przedstawiane dane, ponieważ cement odpowiedzialny jest za większość emisji w tej podgrupie), a w rozdziale 3.2. z podgrupy 24.1. obejmującej produkcję stali i żelaza.

Jeżeli nie jest zaznaczone inaczej, dane dotyczące emisji oraz zużycia paliw w tych sektorach wykorzystywane w niniejszym raporcie pochodzą z cyklicznej publikacji Głównego Urzędu Statystycznego (GUS), *Roczniki przemysłu*. Wielkość emisji w całej gospodarce ustalono na podstawie danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE, 2023).





## 1.1. Kontekst polityczny i regulacyjny

### 1.1.1. POWRÓT POLITYKI PRZEMYSŁOWEJ NA ŚWIECIE

W 2022 r. polityka przemysłowa – rozumiana jako aktywne oddziaływanie państwa na strukturę i wolumen krajowej produkcji przemysłowej – powróciła do użytku w państwach zachodnich. Wpływ na to miało kilka czynników. Już epidemia COVID-19 w 2020 r. unaoczniała wrażliwość międzynarodowych łańcuchów dostaw na ekonomiczne szoki. Podkreśliła też konieczność zwiększenia ich odporności poprzez dywersyfikację oraz skrócenie.

W ostatnim czasie czynniki geopolityczne wpłynęły na intensyfikację dążeń zachodnich państw do zmniejszenia ekonomicznej zależności (tzw. *decoupling*) od chińskiej produkcji przemysłowej i zasadność relokacji produkcji do kraju (tzw. *reshoring*) lub państw sojuszniczych (*friendshoring*). Te czynniki, w połączeniu z motywacjami wynikającymi z polityki klimatycznej, stały za przyjęciem przez Stany Zjednoczone w sierpniu 2022 r. *Inflation Reduction Act* (IRA).

#### Czym dokładnie jest IRA?

IRA jest rozbudowanym aktem wprowadzającym szereg mechanizmów wsparcia dla technologii net-zero (technologii zeroemisyjnych), głównie w drodze ulg podatkowych (*tax credits*), zarówno dla konsumentów tych technologii (np. ulga na zakup pojazdów elektrycznych dla gospodarstw domowych), jak i ich producentów (White House, 2023). Przewidziane w IRA instrumenty wsparcia mają na celu zwiększenie krajowej produkcji technologii net-zero poprzez zachętę do relokacji dla zagranicznych inwestycji.

Jednym z bardziej kontrowersyjnych elementów IRA są wymogi dotyczące tzw. komponentu lokalnego (*local content*) subsydiowanych produktów, czyli udziału krajowej produkcji w ich wytworzeniu. Uzależnienie wsparcia finansowego dla producentów od odpowiedniego poziomu komponentu lokalnego ma przyczynić się do utrzymania, a nawet relokacji produkcji przemysłowej do Stanów Zjednoczonych. Wymogi dotyczące komponentu lokalnego produktów mają dodatkowo zapewnić, że inwestycje te również w swoim łańcuchu wartości korzystają z lokalnie wyprodukowanych półproduktów i usług.

#### Unijna odpowiedź na IRA

Skala subsydiów przewidzianych w IRA jest w Unii Europejskiej postrzegana jako potencjalne zagrożenie dla konkurencyjności europejskiego przemysłu. Te obawy, w połączeniu z koniecznością minimalizacji zależności od państw trzecich w zakresie produkcji kluczowych technologii niskoemisyjnych, skłoniły unijnych decydentów do podjęcia działań w zakresie klimatycznej polityki przemysłowej. Komisja Europejska przedstawiła ogólny plan działania w tym obszarze w *Planie przemysłowym Zielonego Ładu* (ang. *Green Deal Industrial Plan*, GDIP) (Komisja Europejska, 2023a). Dokument ten stanowi europejską odpowiedź na IRA (Kleimann i in., 2023). Komisja wytyczyła w nim kilka celów i działań w obszarze zielonej polityki przemysłowej:

1

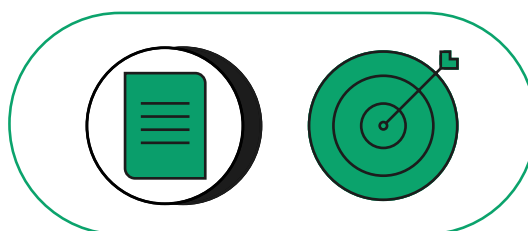
**Poprawa regulacyjnego otoczenia dla kluczowych technologii klimatycznych.** Cel ten realizować ma przyjęcie aktu w sprawie przemysłu neutralnego emisyjnie (*Net-Zero Industry Act*, NZIA) oraz aktu w sprawie surowców krytycznych (*Critical Minerals Act*), których projekty Komisja przedstawiła w marcu 2023 r. Interwencje regulacyjne obejmują też reformę rynku energii elektrycznej z myślą o ochronie konsumentów przemysłowych przed krótkoterminowymi wahaniami cen energii poprzez wsparcie długoterminowych kontraktów na energię w rodzaju *Power Purchase Agreements* (PPA) oraz kontraktów różnicowych (CfD).

2

**Tymczasowe poluzowanie ram pomocy publicznej dla kluczowych dla dekarbonizacji sektorów** realizowane przez przedłużenie obowiązywania i modyfikację treści *Tymczasowych kryzysowych ram środków pomocy państwa w celu wsparcia gospodarki po agresji Rosji wobec Ukrainy*. Dokument ten, przyjęty w lutym 2022 r.<sup>2</sup>, reguluje zasady przyznawania pomocy publicznej w sytuacjach kryzysowych. W marcu 2023 r. Komisja zaktualizowała go zgodnie z założeniami GDIP<sup>3</sup>, zwiększając możliwość przyznawania wsparcia dla wybranych sektorów, które są kluczowe dla osiągnięcia celów GDIP. Zliberalizowane zasady pomocy publicznej pozwalają też warunkowo na udzielanie pomocy publicznej o wartości równej pomocy dostępnej dla beneficjenta za granicą, w celu zatrzymania jego inwestycji w kraju, co wydaje się rozwiązaniem wprost odpowiadającym na IRA.

3

**Utworzenie Platformy Technologii Strategicznych dla Europy** (ang. *Strategic Technologies for Europe Platform*, STEP), czyli stworzenie mechanizmów wsparcia fiskalnego dla kluczowych dla dekarbonizacji przemysłu technologii, pierwotnie znanej jako Europejski Fundusz Suwerenności.



<sup>2</sup> Komisja Europejska, *Komunikat Komisji. Tymczasowe kryzysowe ramy środków pomocy państwa w celu wsparcia gospodarki po agresji Rosji wobec Ukrainy* (Dz. Urz. UE, 2022/C 131 I/01, s. 1–17.).

<sup>3</sup> Komisja Europejska, *Komunikat Komisji. Tymczasowe kryzysowe i przejściowe ramy środków pomocy państwa w celu wsparcia gospodarki po agresji Rosji wobec Ukrainy* (Dz. Urz. UE, 2023/C 101/3, s. 3–46).

## Projekt aktu w sprawie przemysłu neutralnego emisyjnie

Główne rozwiązania regulacyjne, mające wspierać osiągnięcie celów GDIP, zawarte są w projekcie aktu w sprawie przemysłu neutralnego emisyjnie (NZIA). Projekt postępuje się kategorią „strategicznych technologii neutralnych emisyjnie”. Obejmują one m.in. produkcję paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych, pomp ciepła, baterii elektrycznych i magazynów energii oraz komponentów tych technologii<sup>4</sup>. W odniesieniu do nich akt ustanawia cel osiągnięcia do 2030 r. mocy produkcyjnych w UE wynoszący 40% rocznego zapotrzebowania. Obecnie unijny udział produkcji tych technologii waha się od kilku procent w przypadku PV, do niemal całości zapotrzebowania w przypadku turbin wiatrowych (Sgaravatti i in., 2023; PwC, 2023).

Projekt NZIA zobowiązuje państwa członkowskie do przeglądu procedur administracyjnych i sądowych oraz nadania projektom związanym z technologiami neutralnymi emisyjnie priorytetowego statusu we wszystkich postępowaniach. Umożliwiać ma to ustanowienie procedury tzw. jednego okienka (ang. *one-stop-shop*) dla uzyskiwania wymaganych zezwoleń. Zakres technologii, których wymóg ten dotyczy jest szerszy od strategicznych technologii wymienionych wcześniej i obejmuje też np. małe reaktory modułowe (SMR).

W odniesieniu do technologii CCS, NZIA zobowiązuje państwa członkowskie – przy udziale spółek z sektora wydobywczego ropy i gazu – do identyfikacji zarówno krajowego popytu na korzystanie z technologii CCS, jak i oszacowania krajowego potencjału składowania CO<sub>2</sub>.

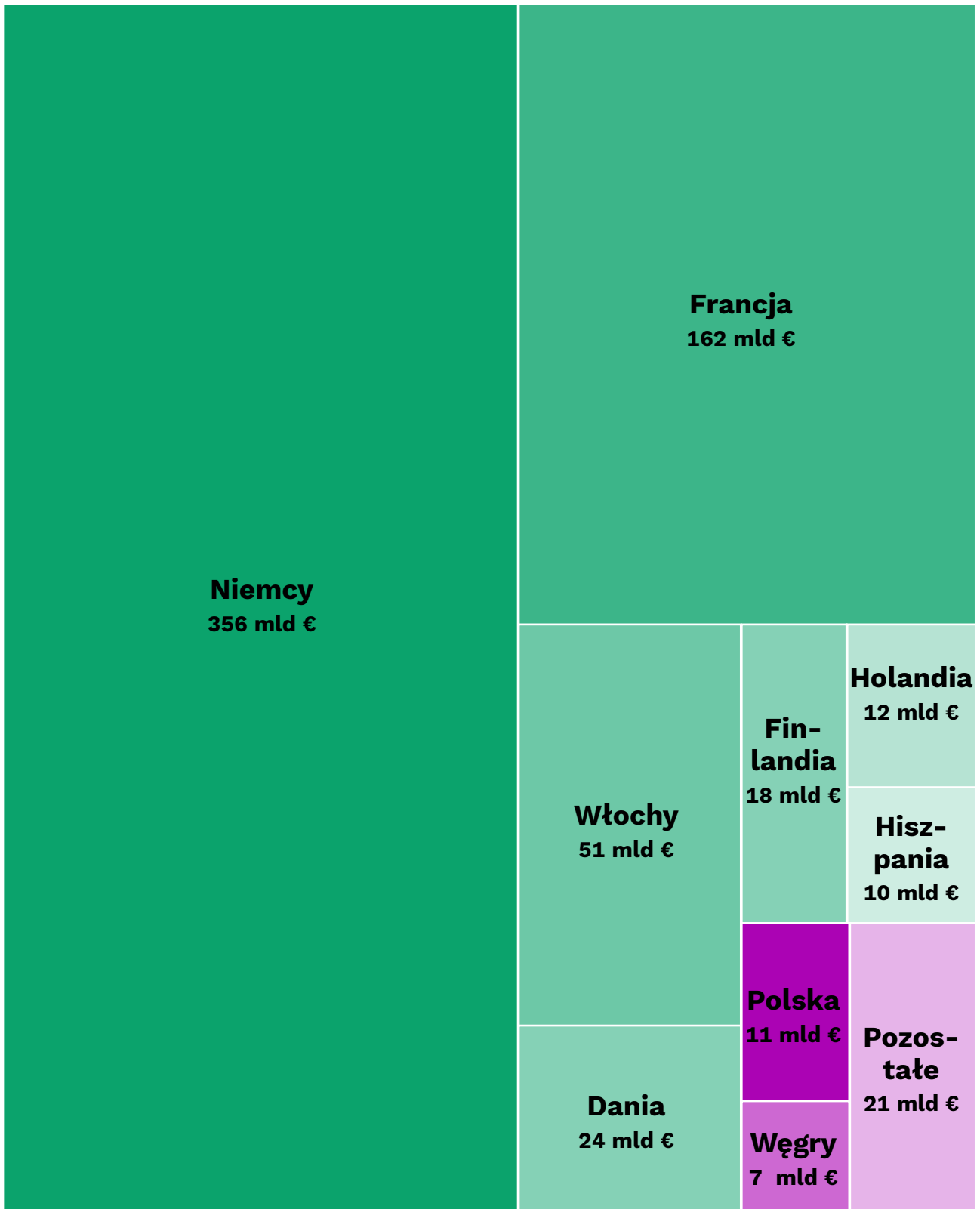
Ponadto NZIA proponuje rozwiązania w celu wzmocnienia kompetencji związanych z technologiami neutralnymi emisyjnie na rynku pracy oraz priorytetyzacją lokalnie produkowanych technologii zeroemisyjnych w zamówieniach publicznych (Kleimann i in., 2023).

Dla wsparcia unijnego przemysłu i powodzenia europejskiej odpowiedzi na IRA kluczowa jest jednak kwestia pomocy publicznej dla przemysłu. Poluzowanie ogólnych ram jej udzielania pozwoliło państwom członkowskim konkurować z subsydiami przewidzianymi w IRA. Może jednak także przyczynić się do zaburzenia konkurencji wewnątrz Unii, poprzez umożliwienie państwom o największych możliwościach budżetowych intensywniejszego wspierania ich krajowych sektorów przemysłowych. Obawy te potwierdza fakt, że zdecydowana większość wsparcia przyznanego od marca 2022 r. na podstawie tymczasowych ram pomocy publicznej została przyznana przez Niemcy (53%) oraz Francję (24%) (Komisja Europejska, 2023b).

---

<sup>4</sup> Pełna lista tych technologii obejmuje: technologie fotowoltaiczne, technologie lądowej i morskiej energii wiatrowej, technologie magazynowania energii w akumulatorach, pompy ciepła i technologie energii geotermicznej, elektrolizery i ogniwa paliwowe, zrównoważone technologie biogazu/biometanu, technologie wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS) i technologie sieciowe.

**WYKRES 1. Podział pomocy publicznej przyznanej na podstawie ram kryzysowych według państw członkowskich**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych Komisji Europejskiej oraz Fleming i in., 2023.

## Platforma Technologii Strategicznych dla Europy (STEP)

Dominację największych unijnych gospodarek w udzielaniu pomocy publicznej ma niwelować Platforma Technologii Strategicznych dla Europy (STEP), dystrybuująca wsparcie finansowe dla zielonego przemysłu na szczeblu unijnym. Zgodnie z planami Komisji platforma STEP ma dysponować środkami w wysokości 10 mld euro. Finansowanie ma jednak opierać się w całości na zmianie przeznaczenia środków z części dotychczas ogłoszonych programów unijnych, a nie pozyskaniu nowych środków (Komisja Europejska, 2023).

Zarówno interwencje regulacyjne przewidziane w ramach NZIA, jak i finansowanie ze STEP, dotyczyć mają przede wszystkim produkcji wymienionych w NZIA strategicznych technologii neutralnych emisyjnie (tzw. branża *clean-tech*). Tradycyjny przemysł energochłonny jest powiązany z tymi technologiami zarówno jako dostawca niektórych półproduktów koniecznych w ich produkcji (np. stali, potrzebnej do produkcji turbin wiatrowych i pomp ciepła), jak też jako użytkownik i odbiorca tych technologii, który musi zdekarbonizować własną działalność, ale nie jest ich wytwórcą.

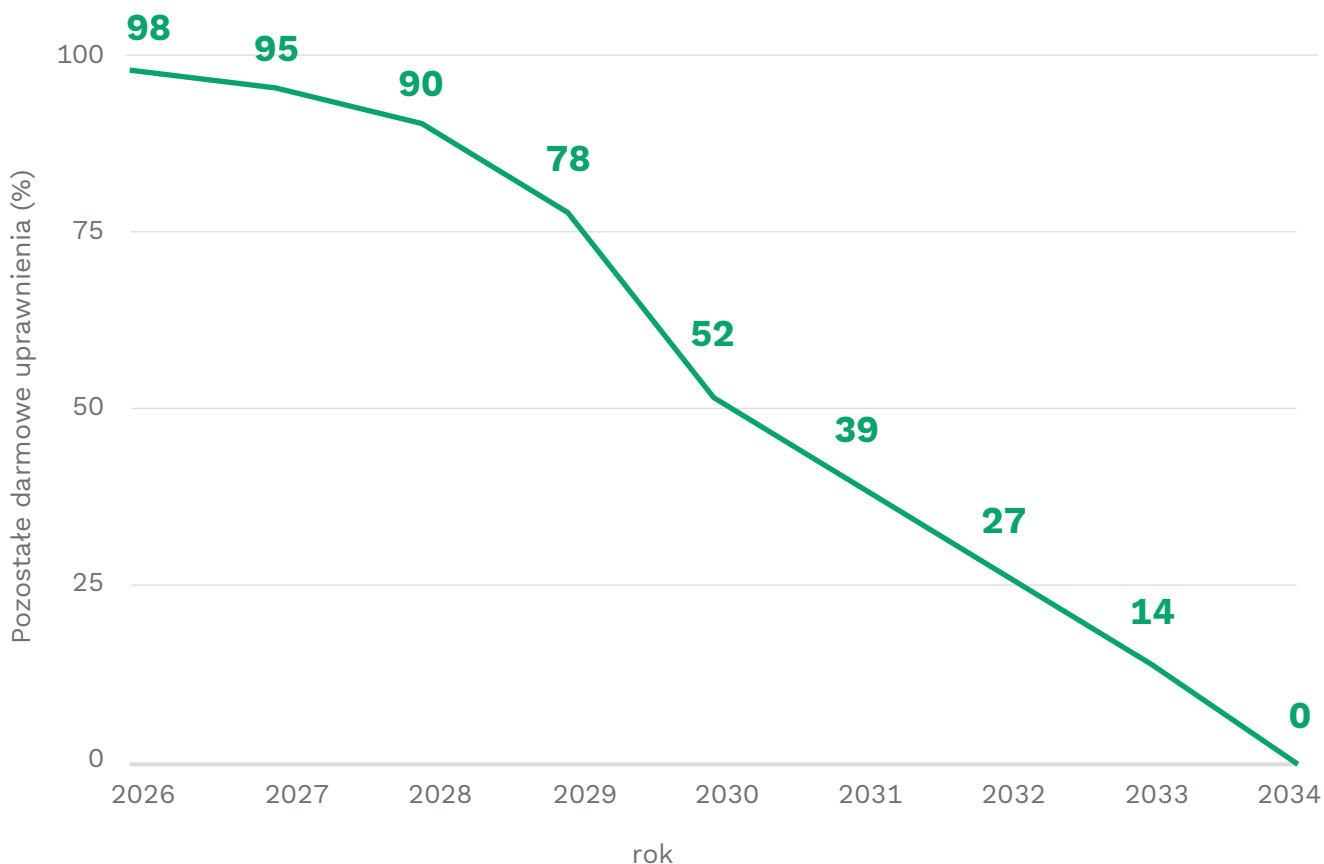
Rozwiązania przewidziane w GDIP poświęcone są więc raczej budowaniu nowych sektorów przemysłowych w UE (np. produkcja paneli fotowoltaicznych czy baterii elektrycznych) niż wsparciu dekarbonizacji tradycyjnego przemysłu energochłonnego. Choć trzeba zaznaczyć, że w tym obszarze państwa członkowskie chętnie korzystają ze zliberalizowanych ram pomocy publicznej.

## Unijny system ETS

Dopełnieniem opisanych mechanizmów wsparcia dekarbonizacji przemysłu jest unijny system opłat za emisje (ETS). System ETS dotyczy sektora przemysłowego dwojako. Po pierwsze, jako trzeci najbardziej emisyjny sektor w Unii (po energetyce i transporcie), sektor przemysłowy sam objęty jest systemem opłat za generowane przez siebie emisje. Póki co, zdecydowaną większość opłat za emisje przemysłowe pokrywają darmowe uprawnienia. Wkrótce ma się to jednak zmienić – w 2030 r. liczba darmowych uprawnień dla przemysłu ma zostać zredukowana o połowę, a zupełnie znikną one w 2034 r. Podobnie jak w energetyce, perspektywa rosnących kosztów uprawnień do emisji ma zmobilizować przemysł do dekarbonizacji.

Istotnym dopełnieniem systemu ETS jest graniczny podatek węglowy (*Carbon Border Adjustment Mechanism* – CBAM). Nakłada on opłaty za emisję również na towary producentów spoza UE. Prowadzi to do wyrównania konkurencyjności unijnych producentów sprzedających na wewnętrznym rynku z producentami z państw trzecich, chcącymi eksportować swoje produkty do UE. Jednak rynki większości produktów przemysłowych są rynkami globalnymi, a unijni producenci eksportują dużą część swojej produkcji poza UE. CBAM nie poprawia więc konkurencyjności unijnej produkcji przemysłowej na rynku międzynarodowym.

## WYKRES 2. Zakładany roczny procent redukcji darmowych uprawnień do emisji EU ETS dla przemysłu



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie: Parlament Europejski, 2022.

Z drugiej strony, przemysły energochłonne są ważnymi odbiorcami energii elektrycznej, która stanowi podstawę wielu procesów produkcyjnych. Ze względu na duży udział węgla w polskim miksie energetycznym, skutkujący wysoką emisyjnością i wysokimi opłatami za emisję, a także starzejącą się flotę elektrowni o spadającej sprawności, koszt energii elektrycznej dla przemysłu w Polsce jest jednym z najwyższych w Europie. Ponadto przemysł sam jest znaczącym konsumentem paliw kopalnych – w 2021 r. odpowiadał za 42% krajowej konsumpcji gazu i 24% węgla (GUS, 2022). Uzależnienie przemysłu od paliw kopalnych wystawia go na szoki wynikające ze wzrostu ich cen.

Uwzględniając fakt, że koszt opłat za emisję ponoszą ostatecznie konsumenci energii, system ETS przewiduje tzw. rekompensaty kosztów pośrednich dla odbiorców z sektorów energochłonnych. Rekompensaty te mają po części zniwelować skutki funkcjonowania systemu ETS w postaci wyższych kosztów energii. Równocześnie ich przyznanie uwarunkowane jest przeznaczeniem części kwot rekompensat na działania zmniejszające ślad węglowy i energetyczny ich beneficjentów, stymulując przemysł do zmniejszania własnego śladu węglowego.

### 1.1.2. POLITYKA PRZEMYSŁOWA W POLSCE?

Niezależnie od działań podejmowanych na poziomie unijnym (choć z ich uwzględnieniem) Polska powinna prowadzić własną, przemyślaną zieloną politykę przemysłową. Jest to tym bardziej istotne w obliczu zdecydowanego subsydiowania krajowego przemysłu przez państwa członkowskie o większych możliwościach fiskalnych. Nie mogąc konkurować skalą subsydiów, Polska powinna zadbać o jak najbardziej przyjazne otoczenie regulacyjne oraz przewidywalność prawa i polityki przemysłowej. Oczekują tego operujące obecnie przedsiębiorstwa przemysłowe oraz nowi inwestorzy.

Polski rząd opracował lub pracuje obecnie nad szeregiem dokumentów odnoszących się do poszczególnych technologii kluczowych dla dekarbonizacji przemysłu. Są to:

- przyjęta w 2021 r. *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040* (MKiŚ, 2021),
- prowadzony aktualnie przez Ministerstwo Rozwoju i Technologii projekt *Strategia rozwoju technologii wychwytu, transportu, utylizacji i składowania CO<sub>2</sub> w Polsce oraz pilotaż Polskiego Klastra CCUS*.

Warto też zwrócić uwagę na ostatnio wprowadzone lub zapowiadane zmiany regulacyjne w obszarze dostępu przemysłu do energii. Chodzi tu o zapowiedź utworzenia specjalnych stref energetycznych, w których duże zakłady przemysłowe będą mogły liczyć na niższe rachunki za prąd i łatwiejsze warunki przyłączeń (PSE, 2023). Przywołać trzeba też wprowadzone już zmiany prawne w zakresie linii bezpośredniej i *cable pooling* (Elźbieciak, Skłodowska, 2023), które ułatwią przedsiębiorstwom pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych.

Brakuje jednak strategii rządowych odnoszących się do sektorowych potrzeb i ścieżek dekarbonizacji, które są różne w poszczególnych branżach. Ostatnim dokumentem akcentującym tę perspektywę jest opracowana przez MRiT w 2021 r., choć nigdy oficjalnie nie przyjęta przez rząd, *Polityka Przemysłowa Polski* (MRiT, 2021). W dokumencie tym położono duży nacisk na zidentyfikowanie potrzeb i wyzwań specyficznych dla głównych sektorów przemysłowych. Dopełnieniem tego mają być „kontrakty branżowe”, czyli dokumenty strategiczne wypracowywane podczas bilateralnych rozmów rządu z przedstawicielami poszczególnych sektorów przemysłowych.

Innym istotnym dokumentem strategicznym opracowanym przez MRiT jest *Strategia produktywności 2030*, przyjęta przez rząd w lipcu 2022 r. Strategia, pomimo że nawiązuje do koncepcji kontraktów branżowych (MRiT, 2022, s. 45), odnosi się jednak w głównej mierze do ogólnych potrzeb szeroko pojmowanego przemysłu, takich jak dostęp do odpowiedniego kapitału ludzkiego lub przyjaznego otoczenia instytucjonalnego dla biznesu. Obecnie więc, pomimo upływu ponad dwóch lat od deklaracji ich wdrożenia, kontrakty branżowe nie zostały wypracowane, choć w maju 2023 r. MRiT powróciło do tego pomysłu (MRiT, 2023).

Niski jest też priorytet nadawany dekarbonizacji przemysłu w szerszych dokumentach strategicznych. Przemysł jest zaledwie wzmiankowany w *Krajowym planie na rzecz energii i klimatu* (MAP, 2019), czy *Krajowym Planie Odbudowy*, w którym – jeżeli nie liczyć wsparcia dla technologii wodnorodnych – jedynie kilka planowanych działań odnosi się do dekarbonizacji przemysłu.

## 1.2. Kontekst technologiczny

Procesy przemysłowe charakteryzują się dużą złożonością i zróżnicowaniem, nie tylko pomiędzy sektorami, ale również pomiędzy różnymi produktami wytwarzanymi w tym samym sektorze, w zależności od przyjętych rozwiązań technologicznych. Z tego powodu rozwiązania pozwalające na dekarbonizację przemysłu również silnie będą zależeć od kształtu lokalnego procesu produkcji i stosowanych technologii. Pomimo tego, możliwe jest wskazanie kilku kluczowych dla dekarbonizacji przemysłu technologii.



### Elektryfikacja

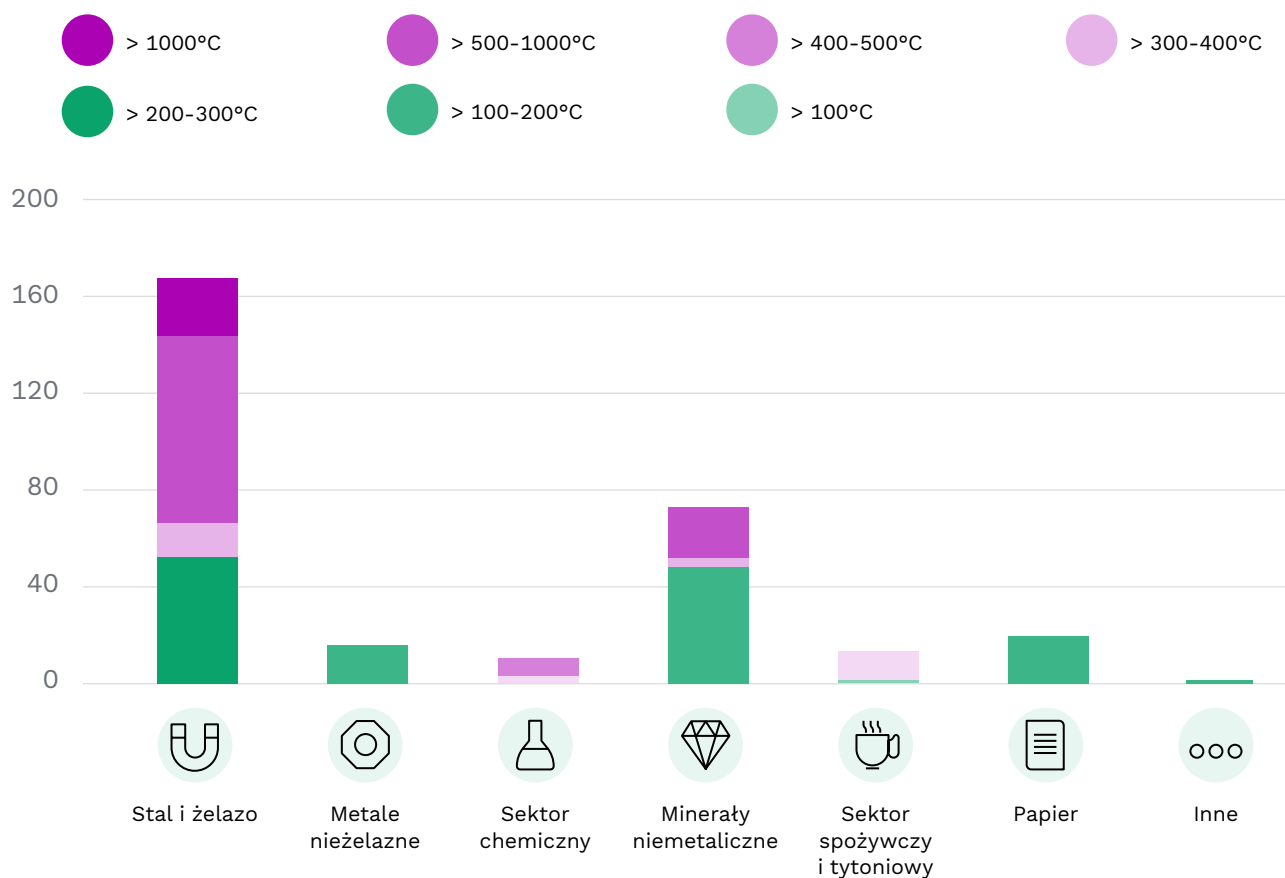
Jednym z głównych źródeł emisji w przemyśle jest wytwarzanie energii cieplnej potrzebnej do procesów przemysłowych wymagających wysokich temperatur. Aż 95% ciepła wykorzystywanego w wysokotemperaturowych procesach pochodzi z bezpośredniego spalania gazu, węgla lub ropy (IEA, 2019, s. 117). Choć niektóre procesy przemysłowe w branżach energochłonnych opierają się już obecnie na ciepłe z energii elektrycznej (np. produkcja stali w technologii łuku elektrycznego).

Procesy przemysłowe wykorzystujące niskie (do 200°C) i średnie (do 500°C) temperatury mogą zostać relatywnie łatwo zelektryfikowane przez zastąpienie pieców gazowych i węglowych przemysłowymi pompami ciepła czy elektrycznymi bojlerami (Agora Industry, FutureCamp, 2022). Elektryfikacji tych procesów musi jednak towarzyszyć zapewnienie energii z bezemisyjnych źródeł, zarówno poprzez zwiększanie ich udziału w miksie elektroenergetycznym, jak i ułatwianie przedsiębiorstwom przemysłowym samodzielnego pozyskiwania zielonej energii przez umowy PPA lub inwestycje we własne źródła OZE i magazyny energii.

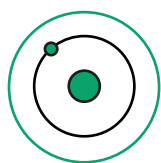
Elektryfikacja procesów wymagających wyższych temperatur (np. wypalania klinkieru w produkcji cementu) jest również możliwa, ale często trudniejsza technicznie ze względu na konieczność znacznej ingerencji w istniejące instalacje. Wiąże się to z dodatkowymi kosztami, które nie są wymagane przy zastępowaniu paliw kopalnych paliwami niskoemisyjnymi, np. zielonym wodorem (Friedman i in., 2019, s. 50).



**WYKRES 3. Udział przedziałów temperatur w procesach przemysłowych w podziale na branże (TWh/rok)**



Źródło: Papapetrou i in., 2018.



### Zeroemisyjny wodór

Wodór wykorzystywany jest obecnie jako surowiec lub reagent w wielu procesach przemysłowych w sektorze chemicznym oraz rafineryjnym do produkcji substancji, takich jak amoniak (będący podstawą większości nawozów) czy metanol oraz w procesach rafinacji ropy (hydrokraking).

Obecnie wodór stosowany w tych procesach pochodzi jednak z gazu ziemnego (rzadziej z węgla), co wiąże się z emisjami gazów cieplarnianych. Zeroemisyjny wodór powstaje z kolei w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem bezemisyjnej energii elektrycznej. Dekarbonizacja procesów przemysłowych z użyciem wodoru oznacza więc:

- 1 Zastąpienie wykorzystywanego obecnie wodoru wodorem bezemisyjnym.
- 2 Przystawienie procesów, które korzystają obecnie z gazowych paliw kopalnych (gazu ziemnego), na procesy oparte o bezemisyjny wodór.

W tym celu konieczne jest zapewnienie odpowiedniej podaży bezemisyjnego wodoru, z czym wiąże się szereg wyzwań technologicznych i ekonomicznych. Przede wszystkim proces elektrolizy wiąże się ze stratami energetycznymi rzędu 35% (IEA, 2019a, s. 44). Wodór w postaci gazowej charakteryzuje się też niską gęstością energii. Aby uzyskać objętość pozwalającą na jego efektywny transport, gaz musi zostać sprężony pod wysokim ciśnieniem (ok. 700 atmosfer), skroplony lub włączony w inny związek chemiczny (np. amoniak). Każdy z tych procesów konwersji oznacza dalsze straty energetyczne w przedziale 20–45% (IEA, 2022, s. 140).

Sam transport wodoru również stanowi wyzwanie. Najbardziej efektywną metodą, przynajmniej na odcinkach liczących do kilkuset kilometrów, jest przesył rurociągami. Wymaga to jednak rozbudowy i utrzymania odpowiedniej infrastruktury, do której podłączeni mogą zostać odbiorcy przemysłowi. Wreszcie wykorzystanie wodoru do produkcji energii elektrycznej w końcowej lokalizacji oznacza dodatkową stratę energetyczną, której skala różni się w zależności od sprawności wykorzystywanych instalacji.

Kolejne wyzwanie dla zwiększenia podaży bezemisyjnego wodoru to jego niekonkurencyjność cenowa. Wyprodukowanie 1 kilograma bezemisyjnego wodoru to obecnie koszt średnio 5–6 euro, w porównaniu z kosztem 2 euro dla wodoru pozyskiwanego z gazu (Instytut Energetyki, 2023, s. 7–8). Spadające koszty produkcji energii elektrycznej z OZE oraz inwestycji w instalacje elektrolizy, równoległe z zaostrzeniem polityki klimatycznej UE przejawiającym się wzrostem cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, mogą jednak doprowadzić do istotnego spadku kosztów bezemisyjnego wodoru i parytetu cenowego jeszcze przed 2030 r. (IEA, 2023, s. 81).

Ze względu na opisane aspekty produkcji i transportu oraz ekonomiki, zielony wodór najprawdopodobniej nie znajdzie szerszego zastosowania w tych obszarach, gdzie dekarbonizacja może nastąpić w drodze elektryfikacji, poprzez korzystanie z energii z sieci elektrycznej lub z użyciem baterii (transport indywidualny, ogrzewanie budynków). Jednak w przemyśle, ze względu na kluczową rolę wodoru jako surowca lub reagenta w wielu procesach chemicznych oraz możliwość wykorzystania go jako bezemisyjnego paliwa w procesach grzewczych, zastosowanie wodoru będzie nieuniknione.



### Wychwył (wykorzystywanie) i składowanie CO<sub>2</sub> (CCUS/CCS)

To kolejna kluczowa dla dekarbonizacji przemysłu technologia. Odnosi się ona do wychwytu CO<sub>2</sub> w kontrolowanych warunkach, czyli w instalacjach, w których gaz ten powstaje. Należy odróżnić ją od technologii bezpośredniego wychwytu CO<sub>2</sub> z atmosfery (*Direct Air Capture*). Wychwytywany gaz ma następnie być transportowany – w najbardziej efektywnym kosztowo scenariuszu – za pomocą rurociągów do miejsc podziemnego składowania. Mają to być w szczególności morskie odwierty pozostałe po wydobywaniu ropy naftowej.

Technologia CCS może potencjalnie znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle ze względu na trudne do uniknięcia emisje. Będzie ona kluczowa dla branż o dużym udziale emisji procesowych, dla których brakuje bezemisyjnych alternatyw. Taką branżą jest w szczególności produkcja cementu, w której ponad 60% emisji powstaje w wyniku obróbki skał wapiennych (IEA, 2019b).

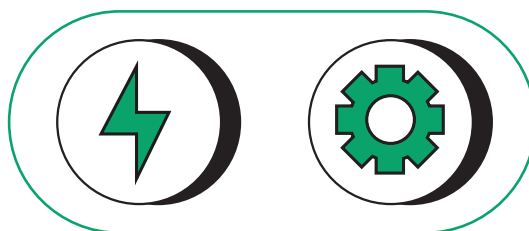
Technologia CCS może też znaleźć ograniczone zastosowanie w sektorze chemicznym czy rafineryjnym. Może także przyczynić się do ograniczania emisji ze spalania paliw kopalnych do generacji ciepła w tych nielicznych procesach, gdzie niemożliwe będą elektryfikacja lub wykorzystanie wodoru jako bezemisyjnego paliwa.

CCS, w jeszcze większym stopniu niż technologie wodorowe, zależy jednak od dostępności infrastruktury do przesyłania i magazynowania zgromadzonego CO<sub>2</sub>. Część wyłapanego CO<sub>2</sub> może zostać wtórnie wykorzystana w innych procesach przemysłowych, takich jak np. produkcja plastików, w przemyśle spożywczym czy rolnictwie. Popyt na CO<sub>2</sub> nie jest jednak dostatecznie wysoki, aby całość wytwarzanego dziś w przemyśle dwutlenku węgla mogła zostać w ten sposób zagospodarowana.



### Substytucja produktów przemysłowych w końcowych zastosowaniach

Odbiorcy produktów przemysłowych, chcąc ograniczyć emisyjność własnych działań, mogą poszukiwać alternatyw dla dotychczas wykorzystywanych materiałów dostarczanych przez ciężki przemysł. Przykładowo, sektor budowlany może w większym stopniu wykorzystywać gruz z odzysku lub rozwijać budownictwo z użyciem drewna, zmniejszając wykorzystanie stali czy cementu. Możliwości tego rodzaju substytucji zależą jednak od konkretnego produktu końcowego i nie zawsze będą dostępne. Wymuszają też daleko idące zmiany w dotychczas stosowanych procesach produkcji, co stanowi barierę dla ich konkurencyjności. Jednak sam fakt poszukiwania alternatyw dla dotychczasowych rozwiązań przez odbiorców w dole przemysłowego łańcucha wartości powinien stanowić dla przemysłów energochłonnych czynnik mobilizujący do dekarbonizacji.



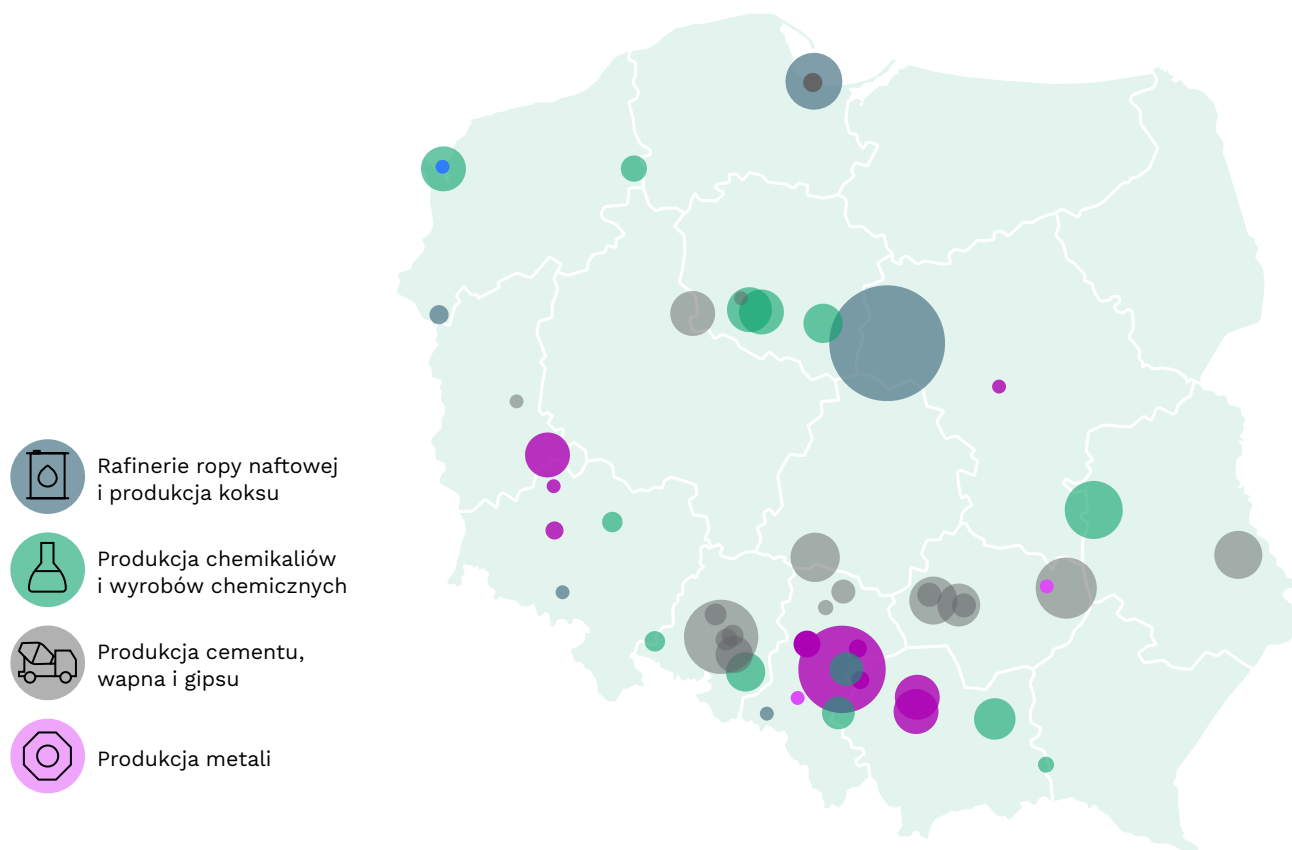


### 1.3. Kontekst regionalny

#### Geografia ekonomiczna

Rola geografii ekonomicznej w przemyśle rośnie (Zachman, McWilliams, 2021). Dlatego powinna być ona uwzględniona w aktualnej polityce przemysłowej Polski. Dekarbonizacja procesów technologicznych, niezależnie od technologii zastosowanych w jej procesie, niemal zawsze łączyć się będzie z koniecznością dostępu do bezemisyjnej energii. Obecne lokalizacje instalacji przemysłowych w Europie i Polsce zostały wybrane w dużej mierze ze względu na bliskość elektrowni węglowych, kopalni węgla i koksowni. W Polsce zlokalizowane są one w większości na południu kraju. Poniższa mapa, stworzona na podstawie Bazy danych o emisjach przemysłowych Instratu, przedstawia zakłady przemysłowe emitujące najwięcej CO<sub>2</sub>.

**MAPA 1. Emisje CO<sub>2</sub> największych emitentów z czterech branż energochłonnych w Polsce w 2019 r.**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie Bazy danych o emisjach CO<sub>2</sub> przemysłów energochłonnych w latach 2010–2020 (Kościótek i in., 2023).

Wielkość kół na mapie odpowiada wielkości emisji CO<sub>2</sub>. Mapa zawiera tylko zakłady emitujące więcej niż 100 tys. ton CO<sub>2</sub> do atmosfery, zgodnie z rejestrem E-PRTR. Zakres emisji – emisje pochodzące ze spalania paliw w ramach generacji prądu i ciepła na potrzeby zakładu przemysłowego (zakres 1).

Wraz z rozwojem mocy wytwórczych w morskiej energetyce wiatrowej oraz energetyce jądrowej, coraz większy ich udział będzie przenosić się na północ kraju. Zasadne będzie więc lokowanie zakładów przemysłowych w tych regionach Polski. Dla inwestorów lokalizacja w pobliżu źródeł wytwarzania energii wiąże się z niższą opłatą za sieć (przesyłową oraz jakościową). Takie rozwiązanie jest też korzystne z systemowego punktu widzenia, gdyż ogranicza zakres budowy i modernizacji sieci energetycznych północ-południe.

Z tego powodu rząd wraz z operatorami sieci przesyłowych energetycznych i gazowych, w tym PSE, zapowiedział utworzenie na północy kraju Specjalnych Stref Energetycznych. Dzięki nim duże zakłady przemysłowe będą mogły liczyć na niższe rachunki za prąd i łatwiejsze warunki przyłążeń (PSE, 2023).



### Inwestycje – w dotychczasowych czy w nowych lokalizacjach?

Relokacja przemysłu z południa na północ Polski stwarza duży potencjał na inwestycje typu *greenfield* (w nowych lokalizacjach). Jednocześnie jednak stawia ona pod znakiem zapytania inwestycje w przekształcenia produkcji w dotychczasowych centrach przemysłowych (*brownfield*). Zmiany te, uzasadnione z punktu widzenia systemu energetycznego oraz rachunku finansowego przedsiębiorstw, będą miały jednak **konsekwencje w wymiarze regionalnym i społecznym**.

Zakłady przemysłowe wraz z zapleczem dostawców stanowią ważne źródło bezpośredniego i pośredniego zatrudnienia na lokalnych rynkach pracy. Jako najwięksi regionalni pracodawcy oraz płatnicy podatków lokalnych i opłat (w tym środowiskowych), stanowią źródło lokalnego dobrobytu. Tym samym potencjalna likwidacja lub ograniczenie ich działalności rodzi ryzyko spadku dochodów podatkowych, wzrostu bezrobocia oraz pogłębiania się nierówności ekonomicznych i terytorialnych<sup>5</sup>.

Potencjalna relokacja lub ograniczenie działalności w wyniku presji konkurencyjnej mniej emisyjnych zakładów przemysłowych – w tym z północnej Polski – rodzi ryzyko regionalnej marginalizacji obecnych ośrodków przemysłowych. Nawet jeżeli dekarbonizacja przemysłu na poziomie kraju skutkować będzie przyrostem netto nowych miejsc pracy, obecne regiony przemysłowe mogą dotkliwie odczuć negatywne skutki ekonomiczne tych działań.

---

<sup>5</sup> Więcej o ocenie ryzyki korzyści związanych z transformacją oraz tym, jak się do niej przygotować, można przeczytać w publikacjach Fundacji InStrat o Wielkopolsce Wschodniej (Hetmański i in., 2021) i dochodach podatkowych gmin węglowych (Swoczyna, 2023).



## Sprawiedliwa transformacja regionów przemysłowych nie tylko górniczych

Dekarbonizacja regionów przemysłowych w Polsce powinna zostać włączona w proces planowania i monitorowania sprawiedliwej transformacji regionów górniczych, tak jak w innych krajach UE. Podobieństwa w zakresie wyzwań i potencjalnych instrumentów pomiędzy górnictwem i energetyką węglową (sektory wygaszane) a trudnymi w dekarbonizacji sektorami wysokoemisyjnymi (sektory podlegające transformacji) stwarzają okazję do zmiany podejścia do sprawiedliwej transformacji również w Polsce<sup>6</sup>.



## Specjalne instrumenty wsparcia

Polskie regiony przemysłowe i przedsiębiorstwa energochłonne powinny zostać beneficjentami odpowiednich instrumentów wsparcia, np. Funduszu i Mechanizmu Sprawiedliwej Transformacji. Co prawda planowanie interwencji w ramach perspektywy finansowej budżetu UE (2021–2027) już się zakończyło, jednak nadal pozostają możliwości adaptacji obecnych programów regionalnych (w ramach regionalnych planów operacyjnych) i krajowych (NFOŚiGW – Fundusz Modernizacyjny). Równoległe na poziomie unijnym toczy się dyskusja o potencjalnej kontynuacji FST i MST w kolejnej perspektywie budżetowej po 2027 r. (Komisja Europejska, 2023c).

Analogicznie do priorytetów tzw. górniczego FST, regiony przemysłowe również powinny uzyskać wsparcie finansowe i pomoc techniczną na **niwełowanie negatywnych skutków transformacji**. W przeciwieństwie do górnictwa i energetyki węglowej, transformacja przemysłów energochłonnych (np. w modelu inwestycji typu *brownfield*) nie musi oznaczać likwidacji lub zmniejszenia liczby miejsc pracy.

Obecnie zakres geograficzny Funduszu Sprawiedliwej Transformacji w Polsce obejmuje zaledwie pięć regionów – Śląsk, Małopolskę Zachodnią, Wielkopolskę Wschodnią, Bełchatów i Wałbrzych. Poza jego zakresem są Turów i Lubelszczyzna, które z racji braku wiarygodnej deklaracji odejścia od węgla, nie otrzymały wsparcia (MFIPR, 2023).

---

<sup>6</sup> Prowadzona przez Komisję Europejską inicjatywa Platformy Regionów Węglowych w Transformacji (ang. *Coal Regions in Transition Platform*) została z czasem włączona w szerszą inicjatywę Platformy Sprawiedliwej Transformacji (ang. *Just Transition Platform*). Synchronizacja działań dotyczących polityki regionalnej oraz energetycznej i przemysłowej pomiędzy właściwymi dyrektoriatami (REGIO, ENER) doprowadziła do silniejszego włączenia w pozostałych krajach UE (głównie Europy Zachodniej) regionów przemysłowych jako beneficjentów Funduszu i Mechanizmu Sprawiedliwej Transformacji (Komisja Europejska, 2023c). Niestety Polska i pozostałe kraje rozszerzenia UE zdecydowały się nie zgłaszać regionów przemysłowych do udziału w naborze na środki z FST i pisaniu terytorialnych planów sprawiedliwej transformacji.



## Wsparcie dla transformacji regionów przemysłowych

Rozszerzenie zakresu instrumentów wsparcia sprawiedliwej transformacji w Polsce na przemysł wysokoemisyjne powinno obejmować aktualizację śląskiego Terytorialnego Planu Sprawiedliwej Transformacji (z uwzględnieniem udziału województwa małopolskiego) z racji położenia na terenach, gdzie koncentruje się przemysł stalowy. W drugiej kolejności powinno uwzględniać wyzwania regionów tzw. Pasa Cementu (patrz dział 3.1.), który ciągnie się od województw lubelskiego i świętokrzyskiego aż po opolskie. Potencjalnym kandydatem jest też województwo kujawsko-pomorskie z przemysłem chemicznym i cementowym. Ostatnimi, ale nie mniej ważnymi, byłyby „wyspowe” ośrodki przemysłowe, niewystępujące w ramach klastrów ekonomicznych (np. rafinerie w Płocku i Gdańsku), ale o nie mniejszym wpływie na gospodarkę regionalną.

### 1.4. Kontekst finansowy









Dla dekarbonizacji przemysłu istotne są również kwestie finansowe. Ze względu na skalę wymaganych nakładów inwestycyjnych niezbędny jest zarówno dostęp do finansowania komercyjnego, jak i wsparcia finansowego ze strony sektora publicznego.

W przypadku finansowania z sektora prywatnego kluczowe jest, aby spółki z branży przemysłowej zapewniły swoich potencjalnych inwestorów, że posiadają dobrze opracowane plany i strategie dekarbonizacji. Rosnące ceny energii i zmieniające się preferencje konsumentów mogą sprawiać, że spółki te tracą na konkurencyjności, a ich wysokoemisyjne aktywa staną się tzw. aktywami osieroconymi.

Aby uniknąć tego ryzyka, inwestorzy oczekiwać będą od spółek przemysłowych udowodnienia, że posiadają one plany na zachowanie konkurencyjności w długim terminie. Potwierdzają to sektorowe standardy dla planów redukcji emisyjności publikowane przez międzynarodowe inicjatywy. Wytyczne dla planów dekarbonizacji spółek operujących w sektorze stali czy cementu przyjęte zostały przez m.in. Science-Based Targets (SBTi, 2022; 2023), czyli niezależną organizację weryfikującą zgodność korporacyjnych celów klimatycznych z nauką, a także grupę zrzeszającą inwestorów instytucjonalnych w działaniach na rzecz klimatu – Institutional Investors Group on Climate Change (IIGCC, 2021).

Sektorom przemysłowym może być jednak trudno zaplanować znaczne nakłady inwestycyjne w sytuacji, w której rosnące koszty energii ograniczają ich marże i zmniejszają rentowność bieżącej działalności. Dodatkowo, zastosowanie wielu technologii niskoemisyjnych wiąże się wciąż z dużym ryzykiem na skutek ich niskiej dojrzałości. Odpowiedzią na rosnące koszty oraz ryzyko związane z nowymi technologiami może być pomoc fiskalna ze strony sektora publicznego. Na poziomie unijnym środki na wdrożenie nowatorskich rozwiązań w zakresie dekarbonizacji pochodzić mogą z Funduszu Innowacyjnego. Obecnie w Polsce z tego źródła finansowane są cztery projekty (tabela 1).

**TABELA 1. Wykaz realizowanych w Polsce projektów finansowanych z Funduszu Innowacyjnego**

Nazwa projektu	Sektor	Beneficjent	Kwota wsparcia
Kujawy Go4ECOPlanet	 Cement	Lafarge Cement	 228,2 mln euro
NORTHSTOR+ Industrialising Green Optimized Li-ion Battery Systems for ESS	 Magazyny energii	NVS Poland, NV Systems AB	 75,5 mln euro
Small scale green hydrogen production facility	 Wodór	Lotos Green H2	 4,5 mln euro
5 MW green hydrogen production facility in Konin	 Wodór	BiW, Exion, ZE PAK	 4,5 mln euro

Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych Komisji Europejskiej.

Innym istotnym źródłem finansowania dekarbonizacji przemysłu jest Fundusz Modernizacyjny, którego krajowym dystrybutorem jest NFOŚiGW. W krajowej puli przewidziany jest program priorytetowy „Przemysł energochłonny – OZE”. W jego ramach przedsiębiorstwa mogą ubiegać się o środki finansowe na budowę własnych instalacji OZE na preferencyjnych warunkach<sup>7</sup>.

Po szokach cenowych na rynkach energii w 2022 r. polski rząd uruchomił też – w oparciu o unijne tymczasowe ramy kryzysowe dla pomocy publicznej – program pomocy publicznej łagodzący skutki rosnących kosztów energii elektrycznej i gazu. W 2022 r. budżet programu wynosił ok. 5 mld zł. Ostatecznie złożono wnioski o przyznanie pomocy na kwotę 3,6 mld zł, z czego przyznano jedynie 2,4 mld zł.

<sup>7</sup> Przegląd złożonych w 2023 r. wniosków zaprezentowano na portalu WysokieNapiecie.pl (Skłodowska, 2023).



Nabór do drugiej edycji programu dotyczącej dofinansowania do kosztów poniesionych w 2023 r. uruchomiono w sierpniu tego roku. Wysokość wsparcia dla wszystkich aplikujących podmiotów obejmuje 50% wartości kosztów energii powyżej 150% średniej ceny płaconej w 2021 r., do wysokości 4 mln euro. Przedsiębiorcy, którzy dodatkowo odnotowali spadek marży operacyjnej oraz z branż narażonych na utratę konkurencyjności, mogą uzyskać wyższe wsparcie. Aby tak się stało, muszą jednak przedstawić plan zmniejszenia energochłonności przedsiębiorstwa. Budżet programu wynosi 5,5 mld zł. Póki co program wciąż oczekuje jednak na zgodę Komisji Europejskiej (Elżbieciak, Zasuń, 2023).

Wsparcie produkcji technologii niskoemisyjnych przewiduje projektowane rozporządzenie MRiT w sprawie szczegółowych warunków i trybu udzielania wsparcia na projekty inwestycyjne o znaczeniu strategicznym dla przejścia na gospodarkę o zerowej emisji netto<sup>8</sup>. To polski program wsparcia technologii net-zero (tych samych, na których skupia się GDIP) przyjęty na podstawie unijnych tymczasowych kryzysowych ram pomocy publicznej.

Projekt zakłada pomoc finansową dla nowych inwestycji w technologie niskoemisyjne o wartości co najmniej 110 mln euro i tworzących co najmniej 50 nowych miejsc pracy. Udzielone wsparcie może wynieść od 35% (do 350 mln euro) do 15% (do 150 mln euro) kosztów inwestycji, w zależności od jej lokalizacji. Całkowity budżet programu wynosi ok. 5 mld zł. Firmy z przemysłu energochłonnego będą jednak beneficjentami tego programu tylko pośrednio (jako odbiorcy technologii niskoemisyjnych), lub w wyjątkowych przypadkach, jeżeli same będą produkować niskoemisyjne technologie (np. wodór) na własne potrzeby.



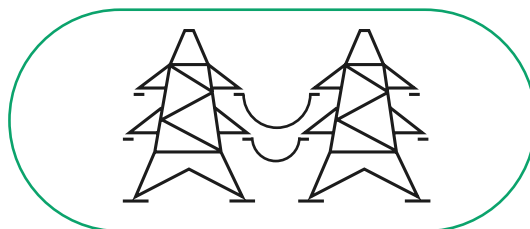
<sup>8</sup> Projekt rozporządzenia Ministra Rozwoju i Technologii w sprawie szczegółowych warunków i trybu udzielania wsparcia na projekty inwestycyjne o znaczeniu strategicznym dla przejścia na gospodarkę o zerowej emisji netto, <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12376902/katalog/13006244#13006244>.

## 2. Zużycie energii, paliw i emisje gazów cieplarnianych w sektorach energochłonnych

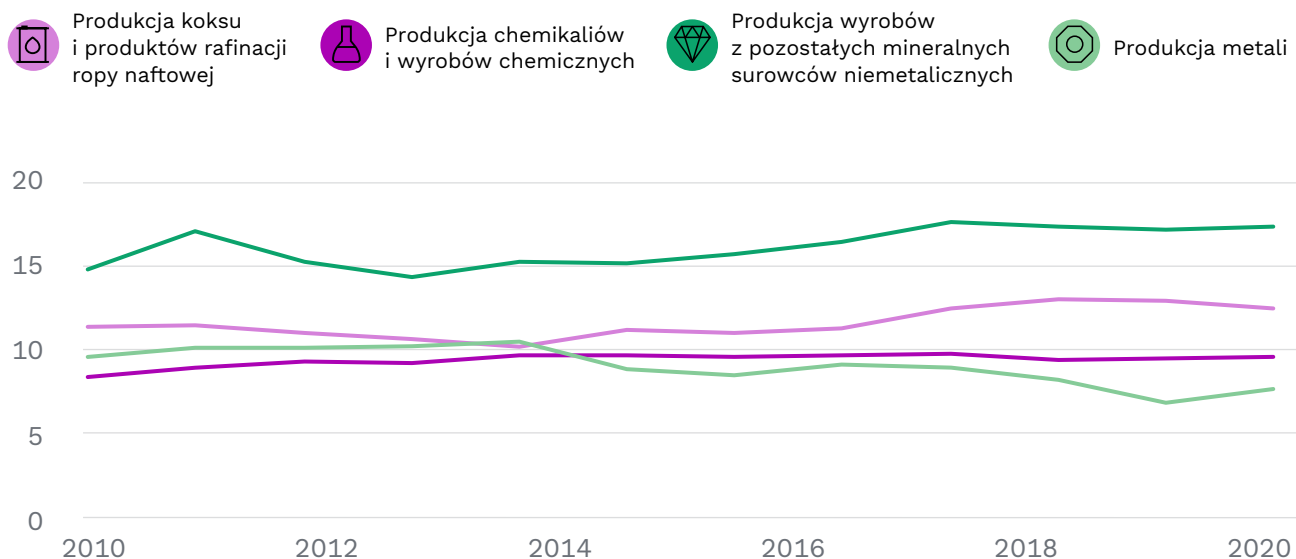
Do dekarbonizacji przemysłów energochłonnych niezbędna jest nie tylko elektryfikacja dostaw energii, ale często także fundamentalna zmiana stosowanych procesów technologicznych. Zmiana miksu paliwowego w kierunku nośników o niższej emisyjności i wzrost efektywności energetycznej mogą prowadzić do zmniejszenia emisyjności wytwarzanych produktów w krótkim terminie, bez wprowadzania daleko idących zmian w istniejących procesach. Stanowią więc tzw. nisko wiszący owoc na drodze do dekarbonizacji gospodarki, choć nie niwelują konieczności wdrożenia dalej idących zmian.

W latach 2015–2021 r. w dwóch z czterech analizowanych w tym raporcie sektorów doszło do istotnych zmian w miksie energetyczno-paliwowym. W przemyśle metalowym spadło znaczenie koksu i półkoksu na rzecz gazu ziemnego, co pozwoliło uniezależnić wzrost produkcji od emisji, które zamiast rosnąć, spadają (zobacz dział 3.2.2.). W sektorze wytwarzania produktów z minerałów niemetalicznych doszło natomiast do wyparcia węgla przez gaz ziemny i odpady.

W latach 2010–2021 emisje w czterech sektorach energochłonnych oscylowały w przedziale 44–49 Mt CO<sub>2</sub> rocznie, co stanowiło 15–17% emisji CO<sub>2</sub> z całej polskiej gospodarki. Jedynie sektor produkcji metali cechował się w analizowanym okresie wyraźną tendencją spadkową emisji, które w latach 2010–2021 spadły o 20% (2 Mt CO<sub>2</sub> rocznie). W pozostałych sektorach emisje wzrosły (produkcja koksu i rafinacja ropy naftowej, wyroby z surowców niemetalicznych) lub pozostały na podobnym poziomie (przemysł chemiczny).



#### WYKRES 4. Emisje CO<sub>2</sub> z energochłonnych sektorów przemysłu wytwórczego w latach 2012–2022 (Mt CO<sub>2</sub>)

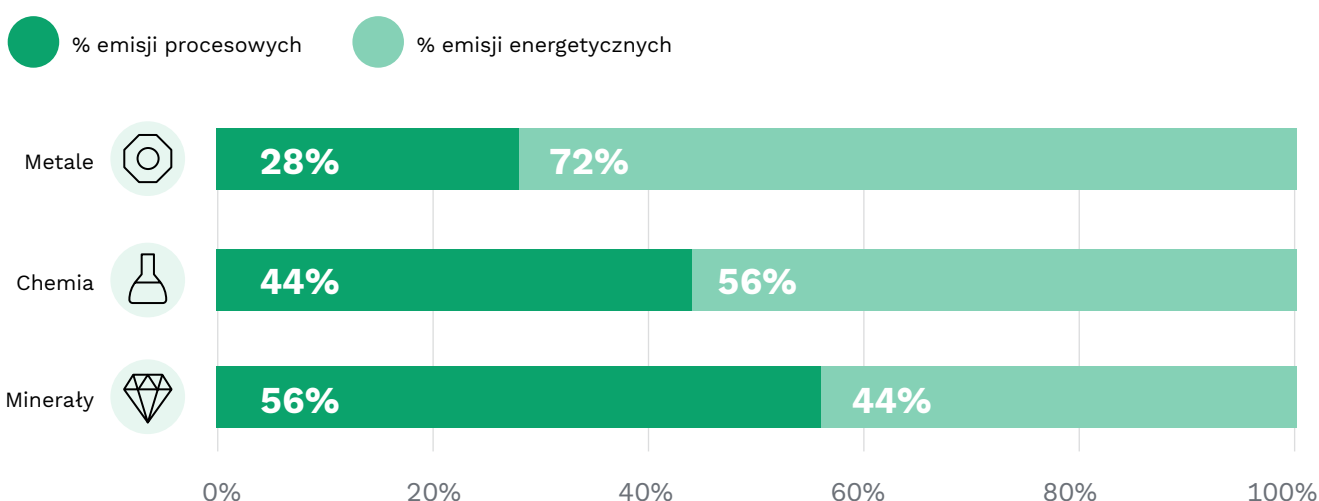


Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

#### Emisje ze spalania paliw a emisje procesowe

Emisje ze spalania paliw stanowią 44–72% emisji gazów cieplarnianych, w zależności od sektora. Pozostałe emisje to emisje procesowe.

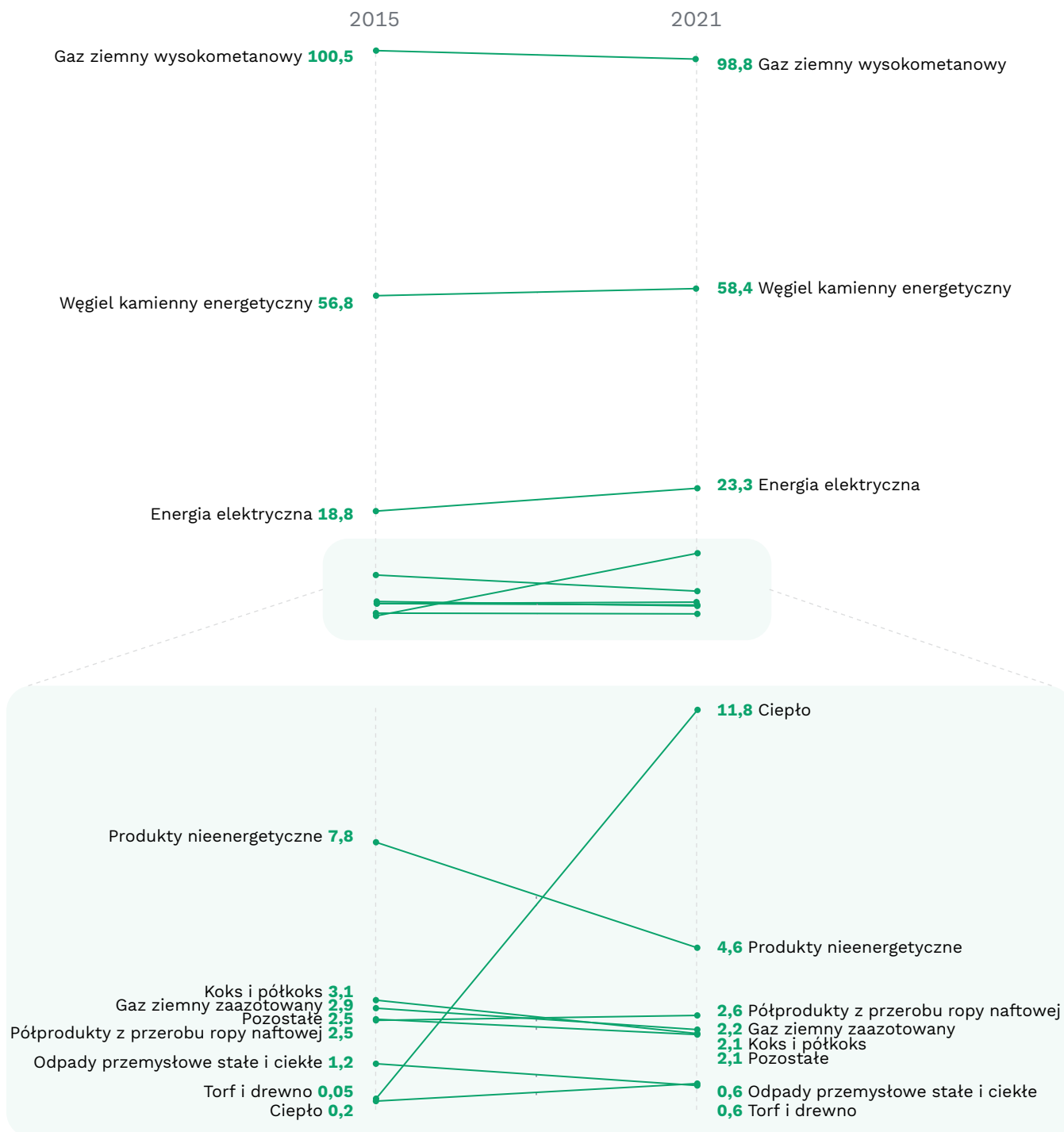
#### WYKRES 5. Procentowy udział emisji gazów cieplarnianych ze spalania paliw (emisje energetyczne) oraz emisji procesowych w łącznych emisjach z sektorów polskiego przemysłu energochłonnego w 2020 r. (w eqCO<sub>2</sub>)



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych UNFCCC.

Ze względu na rozbieżności w kategoryzacji przemysłu pomiędzy PKD a taksonomią UNFCCC, niemożliwe jest rzetelne obliczenie udziału emisji procesowych dla przemysłu rafinacji ropy i wytwarzania koks, dlatego sektor ten został pominięty.

**WYKRES 6. Zużycie paliw i energii w przemyśle chemicznym w Polsce w latach 2015–2021 (PJ)**

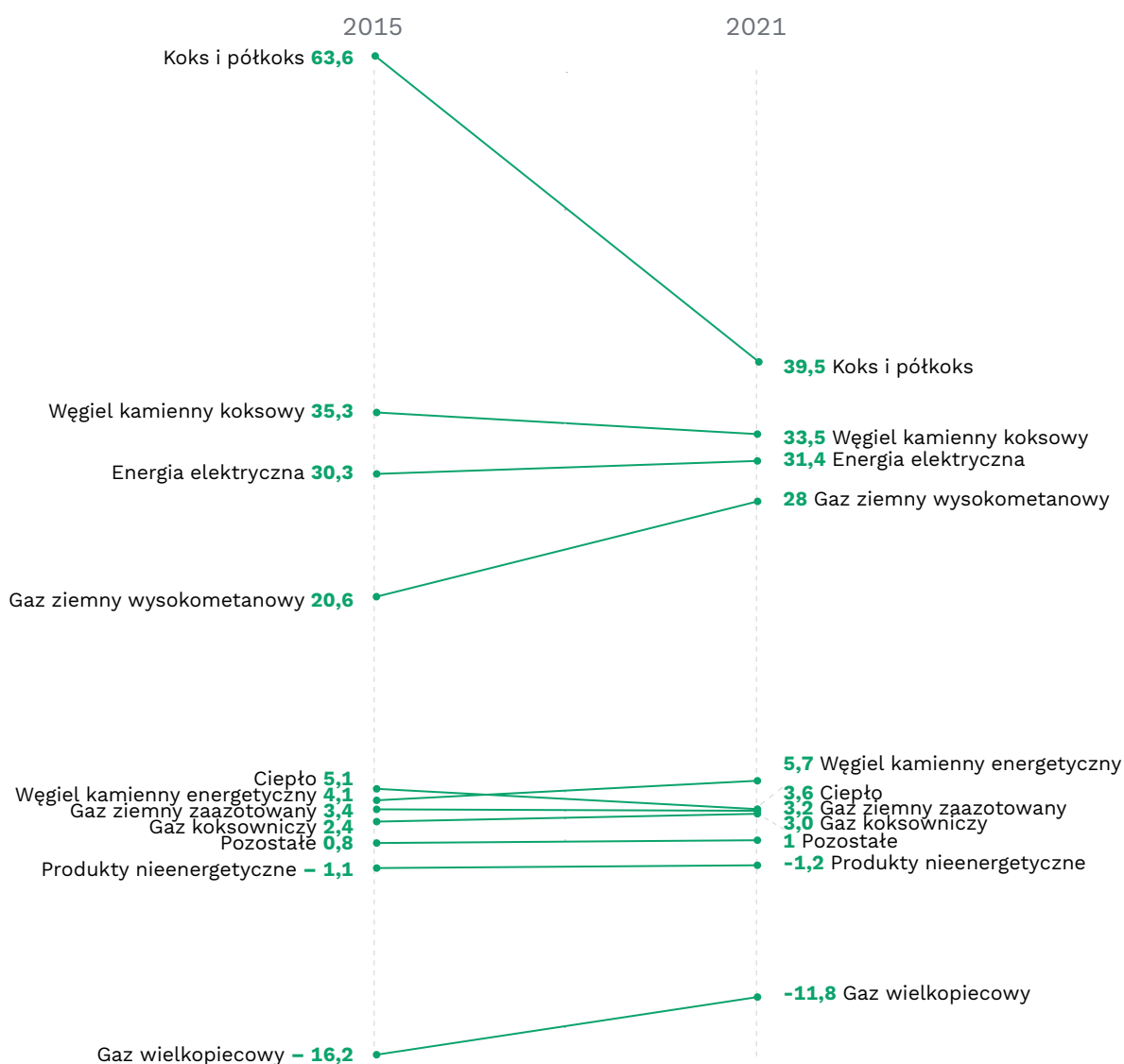


Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

W latach 2015–2021 łączne zużycie paliw i energii w przemyśle chemicznym nieznacznie wzrosło – ze 194 PJ do 205 PJ. W tym czasie produkcja z tego sektora wzrosła w znacznie większym stopniu – z ok. 61 mld zł w 2015 r. do ok. 95 mld zł w 2021 r. (GUS, 2023, s. 71).

Wzrost zużycia energii widoczny był w szczególności w zużyciu ciepła dostarczanego spoza zakładów (ze 145 TJ w 2015 r. do 11 822 TJ w 2021 r.).

**WYKRES 7. Zużycie paliw i energii w przemyśle metalowym w latach 2015–2021 (PJ)**

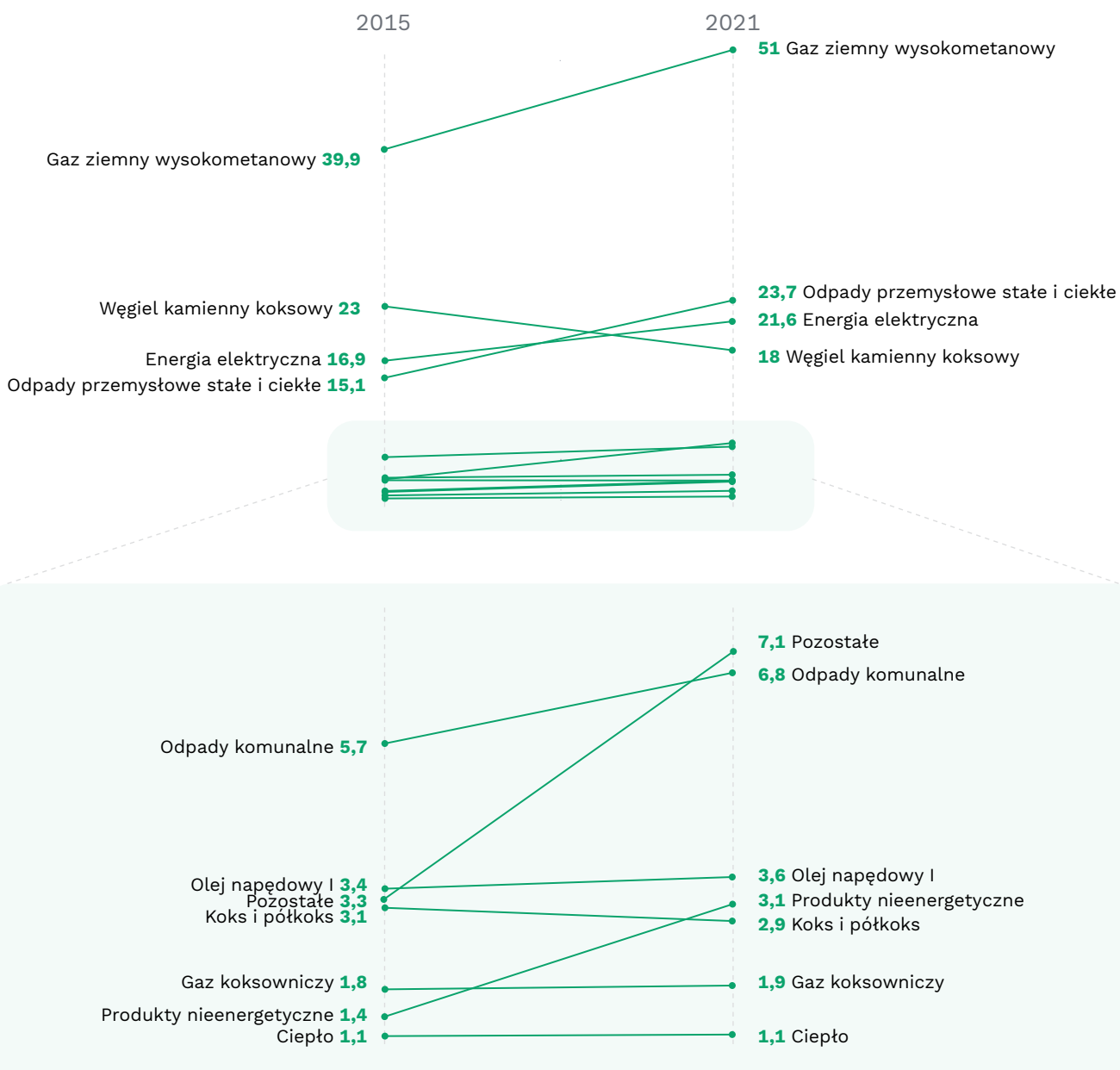


Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

Zmiany w wykorzystaniu paliw w **sektorze metalowym** odzwierciedlają przemiany tej branży w Polsce. W 2020 r., a więc pomiędzy rokiem 2015 a 2021 (wykres 7), przestał działać piec tlenowy w Krakowie (ArcelorMittal, 2020). W tej technologii obecnie działa w Polsce już tylko jedna huta – w Dąbrowie Górniczej, również należąca do ArcelorMittal<sup>9</sup>. Z powodu wygaszenia pieca w Krakowie oraz modernizacji produkcji w hucie w Dąbrowie Górniczej spadło znaczenie zużywanych w tych piecach paliw: koksu i półkoksu (z 63,6 PJ w 2015 r. do 39,5 PJ w 2021 r.). Wzrosło natomiast wykorzystanie w nich gazu ziemnego (kosztem koksu). W związku z tymi zmianami zmalał też eksport gazu wielkopiecowego, który powstaje w piecach tlenowych opalanych koksem.

<sup>9</sup> Technologie produkcji stali opisujemy szerzej w dziale 3.2.1.

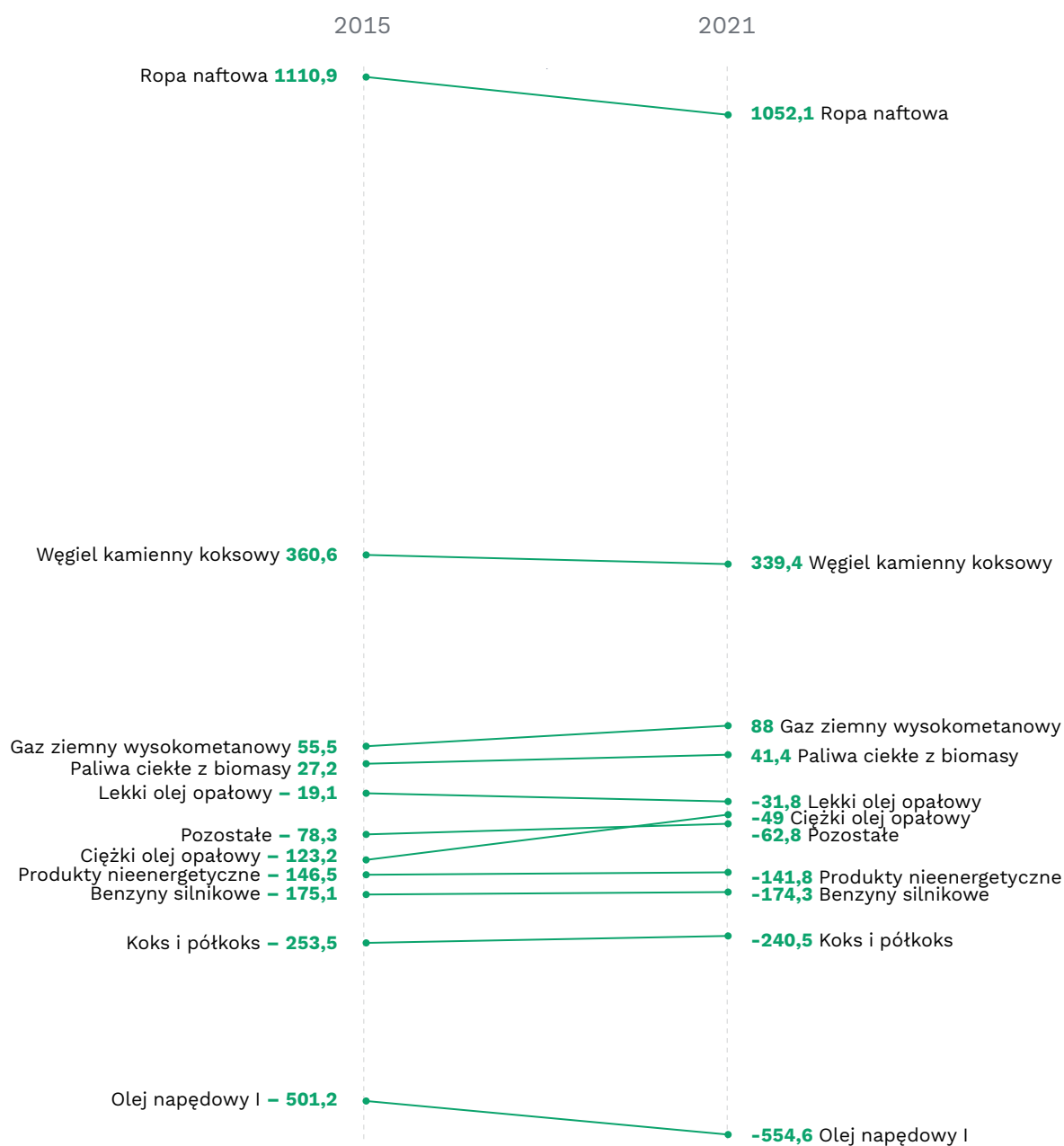
**WYKRES 8. Zużycie paliw i energii w przemyśle minerałów niemetalicznych w latach 2015–2021 (PJ)**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

W **sektorze minerałów niemetalicznych** (którego najważniejszą częścią jest produkcja cementu) zmiany w miksie energetyczno-paliwowym związane są więc przede wszystkim z optymalizacją ogrzewania pieców klinkierowych pod kątem emisji i kosztów. Dlatego w latach 2015–2021 można zaobserwować spadek znaczenia węgla, a wzrost roli gazu ziemnego. W tym samym czasie wzrosło także wykorzystanie jako paliwa odpadów przemysłowych i komunalnych, ponieważ cementownie zaczęły odgrywać istotną rolę w ich utylizacji.

**WYKRES 9. Zużycie paliw i energii w przemyśle rafinacji ropy i wytwarzania koksu w latach 2015–2021 (PJ)**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

W latach 2015–2021 **sektor rafinacji ropy i wytwarzania koksu**, w którego skład wchodzi też petrochemia, zachował podobny miks paliwowy.

Ujemne wartości oznaczają eksport produktów poza zakłady przemysłowe. W przypadku sektora rafinacji ropy i produkcji koksu w Polsce były to w 2021 r. głównie oleje napędowe (555 PJ w 2021 r.), benzyny silnikowe (174 PJ), koks i półkoks (241 PJ) oraz produkty nieenergetyczne (142 PJ), a więc głównie produkty petrochemiczne.

# 3. Studia przypadków – dekarbonizacja produkcji cementu i stali

## 3.1. Pas Cementu

### 3.1.1. EMISJE Z PASA CEMENTU I ŚCIEŻKI JEGO DEKARBONIZACJI

Zakłady wytwarzające cement, wapno i gips odpowiadały w 2022 r. za emisję 13,5 mln ton CO<sub>2</sub> (GUS, 2023). Dane udostępniane przez GUS nie pozwalają na wyodrębnienie samych cementowni, a jedynie zbioru cementowni i zakładów wytwarzających gips i wapno, jednak cementownie odpowiadają za zdecydowaną większość emisji w tej grupie. Wskazana wartość emisji stanowi 23,4% emisji CO<sub>2</sub> pochodzących z przemysłu wytwórczego w Polsce, oraz ok. 6,5% liczonych łącznie emisji CO<sub>2</sub> z sektorów górnictwa, przemysłu, energetyki i gospodarki wodnej. Przeważająca część tych emisji pochodziła z dziewięciu dużych zakładów przemysłowych ulokowanych w Pasie Cementu (Kopeć, 2023). To obszar ciągnący się od południowej Lubelszczyzny, przez województwa: świętokrzyskie, południe łódzkiego, śląskie i opolskie. Udział cementowni z Pasa Cementu we wszystkich emisjach z polskiej gospodarki wynosił w latach 2015–2020 średnio ok. 3,4% (Kopeć, 2023; KOBiZE, 2023).

**WYKRES 10. Procentowy udział emisji CO<sub>2</sub> pochodzących z produkcji cementu, wapna i gipsu w całości emisji z przemysłu wytwórczego 2022 r.**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

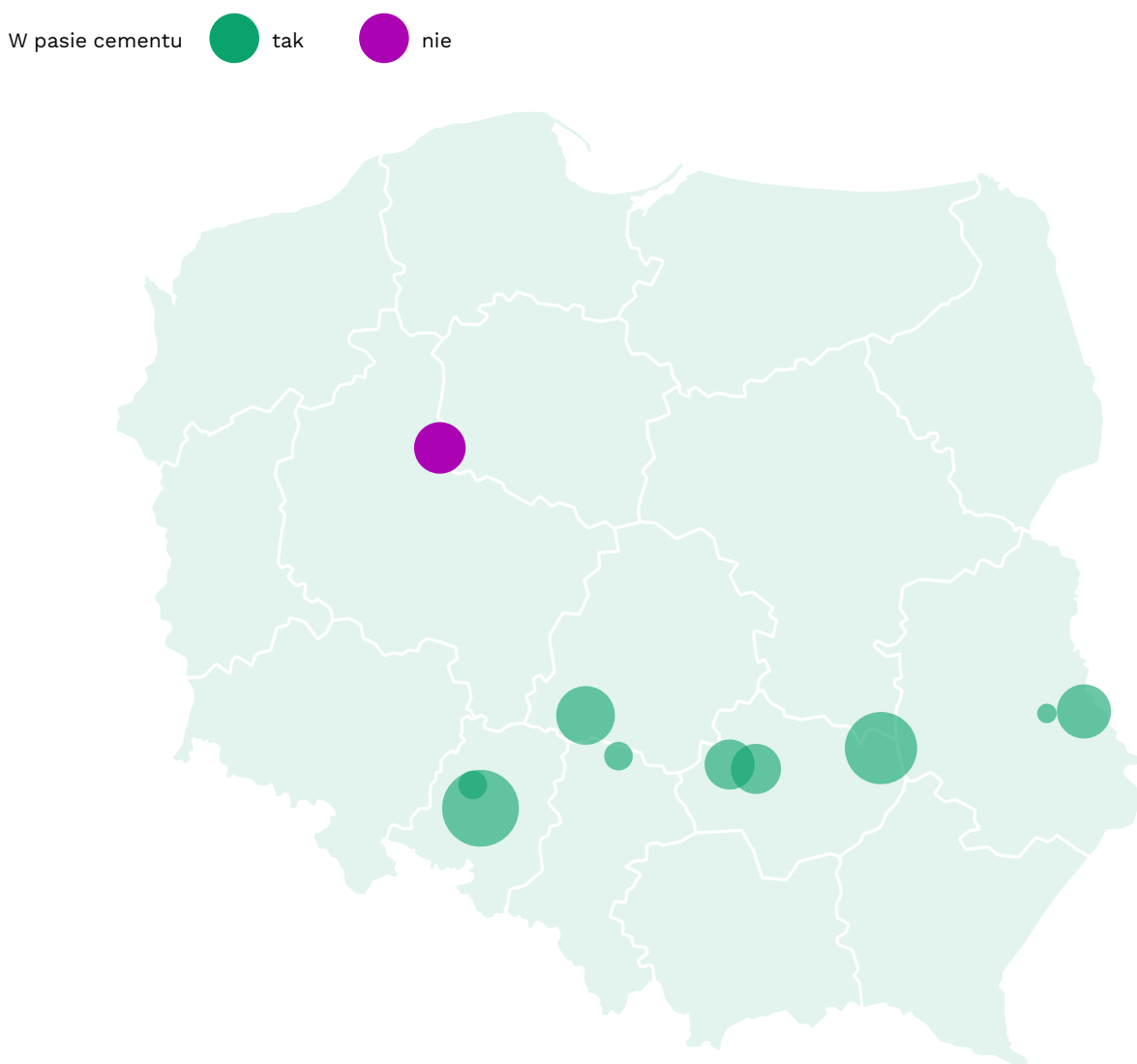


### 3.1.2. KLASTER DEKARBONIZACJI

Koncentracja dużej, wysokoemisyjnej branży, jaką jest produkcja cementu, w jednej części kraju oznacza, że jej wpływ na emisje w tym regionie jest znaczący. Daje to jednak też nadzieję na budowę klastra dekarbonizacyjnego.

W województwie lubelskim cementownie odpowiadały za 27% emisji wszystkich zakładów ujętych w Europejskim Rejestrze Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń – E-PRTR (wykres 11 oraz mapa 2). To więcej niż ulokowana w tym województwie energetyka. Poza województwem lubelskim szczególnie wysoki udział cementowni w emisjach ma miejsce województwach opolskim i świętokrzyskim.

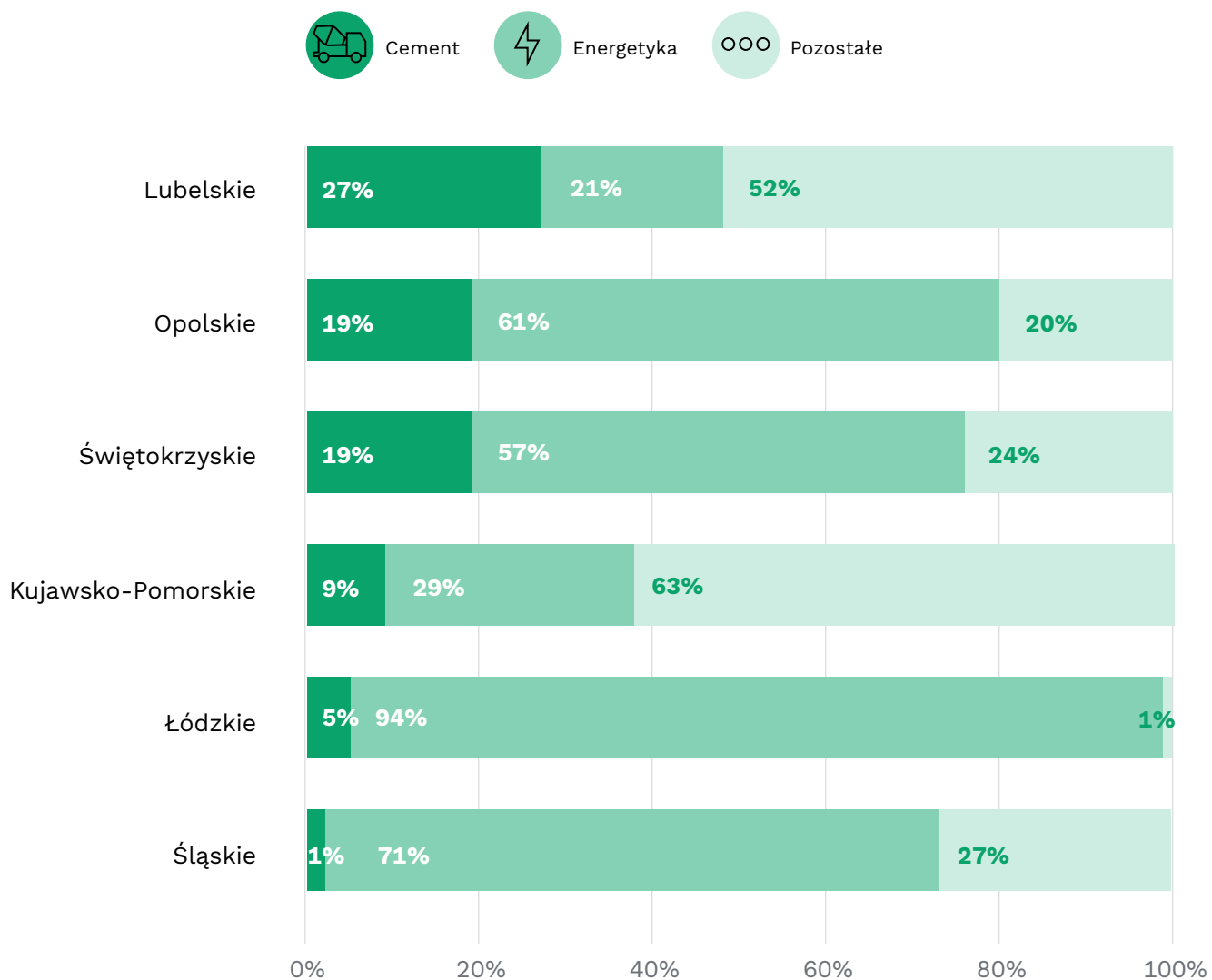
**MAPA 2. Lokalizacje cementowni działających w Polsce**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie: Kościótek i in., 2023.

Wielkość punktów obrazuje sumę emisji CO<sub>2</sub> z danego zakładu w latach 2015–2020.

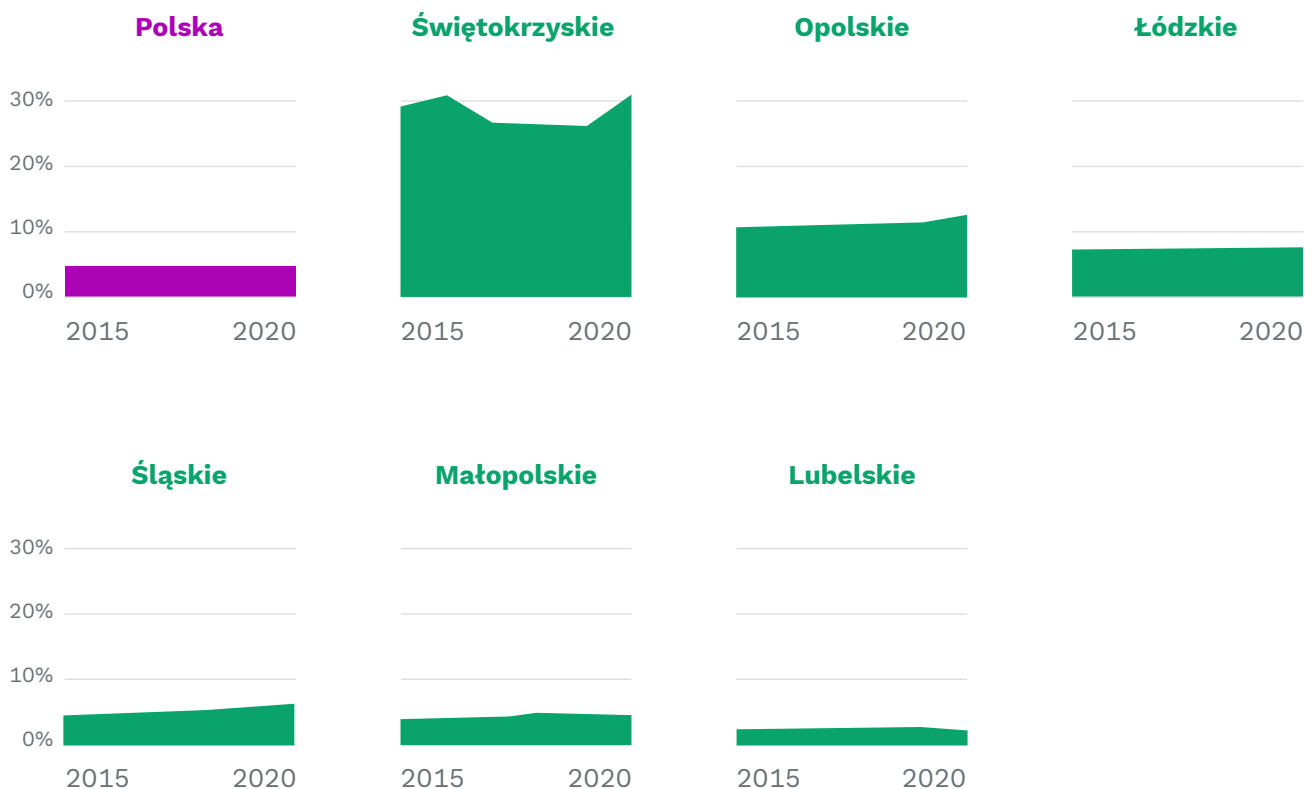
**WYKRES 11. Udział emisji CO<sub>2</sub> z wytwarzania cementu na tle pozostałych gałęzi przemysłu oraz energetyki w województwach tworzących Pas Cementu w latach 2015–2020**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych E-PRTR. Zakres danych obejmuje tylko zakłady znajdujące się powyżej progu zakwalifikowania do tego rejestru.

Dekarbonizacja działających w Pasie Cementu cementowni przyczyniłaby się do znaczących redukcji emisji w tych województwach, a w szczególności w województwie świętokrzyskim. Zakłady przetwórstwa minerałów niemetalicznych, w tym cementownie, odpowiadają tam za ok. 30% sprzedaży produktów przemysłu wytwórczego. Dekarbonizacja tej branży (np. przy zastosowaniu technologii CCS) oznaczałaby możliwość dalszego działania bez obciążenia kosztami emisji funkcjonujących tam zakładów.

**WYKRES 12. Procentowy udział wyrobów z pozostałych surowców niemetalicznych w wartości sprzedanej produkcji z całego przemysłu wytwórczego w województwach należących do Pasa Cementu w latach 2015–2020 oraz łącznie dla całej Polski**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych GUS.

Kategoria wyrobów z pozostałych surowców niemetalicznych obejmuje cementownie i inne zakłady.

W danych GUS bardziej szczegółowa granulacja na poziomie województw nie jest dostępna.

Choć zatrudnienie w cementowniach w skali kraju nie jest duże – w przeciętnej cementowni pracuje kilkaset osób – to ich oddziaływanie na otoczenie społeczno-ekonomiczne jest znaczące. Stowarzyszenie Producentów Cementu wskazywało, że w 2017 r. cementownie odpowiadały za tworzenie bezpośrednio 4 tys. miejsc pracy, a pośrednio ok. 25 tys. (Piestrzyński, 2017).

Cementownie stanowią część całego długiego łańcucha dostaw, który obejmuje też m.in. branże: budowlaną, betoniarską, producentów maszyn, firmy transportowe albo wsparcie produkcji. Skupienie cementowni w jednej części kraju oznacza, że można myśleć o dekarbonizacji tego sektora, jak o projekcie regionalnym. Potencjalna infrastruktura do CCS mogłaby być w nim współdzielona. Także przeznaczenie publicznych środków finansowych, np. z Funduszu Sprawiedliwej Transformacji, mogłoby być nakierowane na wspólne wyzwania wielu zakładów z danego regionu obejmującego nawet kilka województw.

### 3.1.3. PO PIERWSZE ELEKTRYFIKACJA

Pierwszy obszar dekarbonizacji produkcji cementu obejmuje wytwarzanie ciepła. Obecnie cementownie konsumują najwięcej energii w formie gazu ziemnego (51 PJ w 2021 r., czyli 1,4 mld m<sup>3</sup>). Zapotrzebowanie na węgiel spadło z 23 PJ w 2015 r. do 18 PJ w 2021 r. (21%). W tym czasie wzrosło wykorzystanie w celach energetycznych odpadów przemysłowych – z 15 do 24 PJ.

Aby zredukować emisje ze spalania paliw, potrzebna jest **elektryfikacja pieców**. Pomóc w tym może duża podaż zielonej energii elektrycznej z sieci, a także rozpowszechnienie kontraktów PPA i linii bezpośrednich. Zlokalizowanie źródeł energii blisko zakładów, czemu sprzyja skupienie ich w jednym regionie, zmniejszyłoby obciążenie sieci przesyłowych i dystrybucyjnych. Zwolniłoby też odbiorców z części opłat sieciowych. Sąsiedowanie zakładów przemysłowych ze sobą stwarza więc możliwości dla wspólnych inwestycji w zieloną energię.

Problemem na drodze do elektryfikacji pieców w cementowniach jest ich szczególna konstrukcja, która utrudnia dostarczenie wysokotemperaturowego ciepła do poszczególnych części pieca. W dużej mierze są to technologie znajdujące się wciąż na etapie prac badawczych (Hasanbeigi, 2023), choć niektóre doczekały się już pilotażowych wdrożeń (Perilli, 2022).

### 3.1.4. PROBLEM Z REDUKCJĄ EMISJI PROCESOWYCH

Z uwagi na fakt, że 50–70% emisji CO<sub>2</sub> z cementowni to emisje procesowe (w Polsce ok. 56% – wykres 5), elektryfikacja zakładów nie wystarczy, by doprowadzić branżę do neutralności klimatycznej (Sousa, Bogas, 2021; Beyond Zero Emissions, 2017). Trzeba bowiem zredukować także emisje wynikające bezpośrednio z przetwarzania skał wapiennych w klinkier. W tej kwestii rozważane lub już wdrażane w różnych częściach świata są dwie opcje:

1

Wychwyt i sekwestracja CO<sub>2</sub> (CCS) z emisji procesowych na terenie zakładów.

2

Zastępowanie cementu portlandzkiego innymi materiałami o podobnych charakterystykach, głównie geopolimerami.



# 1 opcja

## Wychwyt i sekwestracja CO<sub>2</sub>

Wychwyt CO<sub>2</sub> wiąże się z problemem wysokich dla cementowni kosztów wychwytu i trudności z sekwestracją. Dwutlenek węgla musi być składowany w odpowiednich kawernach lub w podmorskich szelfach, do których trzeba go, w formie gazowej lub skroplonej, dostarczać i wtłaczać. Sama budowa odpowiednich instalacji jest kosztowna, a proces pochłaniania dodatkową energię.

Według szacunków Polskiego Stowarzyszenia Cementu, implementacja CCS na poziomie krajowej branży cementowej może wygenerować zapotrzebowanie na dodatkowe 3,2 TWh energii rocznie (Elźbieciak, 2022). Zaś budowa odpowiedniej sieci przesyłowej, którą wychwycony CO<sub>2</sub> docierałby do miejsc składowania lub statków transportujących go na podmorskie pola, to zadanie wymagające udziału państwa. Nie tylko na poziomie regulacji prawnych, ale prawdopodobnie także finansowania przedsięwzięcia.

Alternatywą dla sekwestracji jest wykorzystanie CO<sub>2</sub> jako surowca. Obecnie wykorzystywany jest on głównie przez branżę spożywczą, rolnictwo, budownictwo i produkcję metali. Według szacunków IEA w 2025 r. popyt na CO<sub>2</sub> ma sięgnąć 272 Mt rocznie (IEA, 2019).

Inny kierunek to wykorzystanie emitowanego w procesach CO<sub>2</sub> do wytwarzania metanolu, który może być później wykorzystywany w przemyśle chemicznym i transporcie (Komisja Europejska, 2021; Narayanan, 2023; VoltaChem, 2023). Wykorzystanie CO<sub>2</sub> powstałego w procesie wytwarzania klinkieru do spalania w silnikach nie będzie jednak zeroemisyjne. Ambicje do zwiększenia wykorzystania CO<sub>2</sub> w Polsce można wyczytać ze strategii PKN Orlen (Orlen, 2023, s. 15).

# 2 opcja

## Geopolimery zamiast cementu

Geopolimery to syntetyczne minerały wytwarzane (bez emisji) z glinu i krzemu, przypominające naturalny kamień (Lelek-Borkowska, 2022). Barierą dla przejścia budownictwa na geopolimery w miejsce cementu portlandzkiego jest przede wszystkim konieczność zbudowania nowych instalacji do produkcji tego surowca. Wybór tej drogi oznacza więc nie tyle dekarbonizację cementowni, co raczej zbudowanie nowego sektora geopolimerowego w miejsce dzisiejszych cementowni. Nowe zakłady mogłyby zostać ulokowane w innych częściach kraju. Nie tam, gdzie jest wapień, ale tam, gdzie produkuje się dużo zielonej energii i jest dostęp do innych surowców. Byłby to więc kolejny przykład zmiany geografii przemysłowej wymuszanej przez dekarbonizację gospodarki (Zachman, McWilliams, 2021).

Rozwiązanie to wiąże się także z problemem cen i dostępu do surowców. W Polsce na razie nie prowadzi się wydobywania surowców pozwalającego na zaspokojenie potrzeb tej branży, więc produkcja geopolimerów wymagałaby zasilania surowcami z zagranicy. Nie ma pewności, czy takie rozwiązanie byłoby ekonomicznie racjonalne.

Oparcie branży budowlanej na geopolimerach w miejsce cementu oznaczałoby też zmianę organizacji łańcuchów dostaw i technologii budowlanych. Dziś cement dostarcza się na budowy za pośrednictwem betoniarni i w dużej mierze wylewa do zaschnięcia na miejscu. Wykorzystanie geopolimerów oznaczałoby, że branża budowlana musiałaby sięgnąć po prefabrykaty wytwarzane przemysłowo w zakładach produkcyjnych.

## 3.2. Ścieżki dekarbonizacji stali

### 3.2.1. DWIE TECHNOLOGIE

Dwie główne technologie produkcji stali to technologia pieca tlenowego (BOF) oraz elektrycznego pieca łukowego (EAF):

- **Technologia pieca tlenowego (BOF)** – produkcja stali w tej technologii zintegrowana jest zazwyczaj w hutach z procesem produkcji żelaza. Proces produkcji wygląda, w dużym uproszczeniu, następująco: w pierwszym etapie, w tzw. wielkim piecu (hutniczym), ruda żelaza przetwarzana jest na surówkę. Koks używany jest w tym procesie jako reagent. Podczas drugiego etapu produkcji, w piecu nazywanym konwertorem, żelazna surówka jest utleniana, co prowadzi do uzyskania stali. Jako paliwo wykorzystywane są węgiel lub gaz.

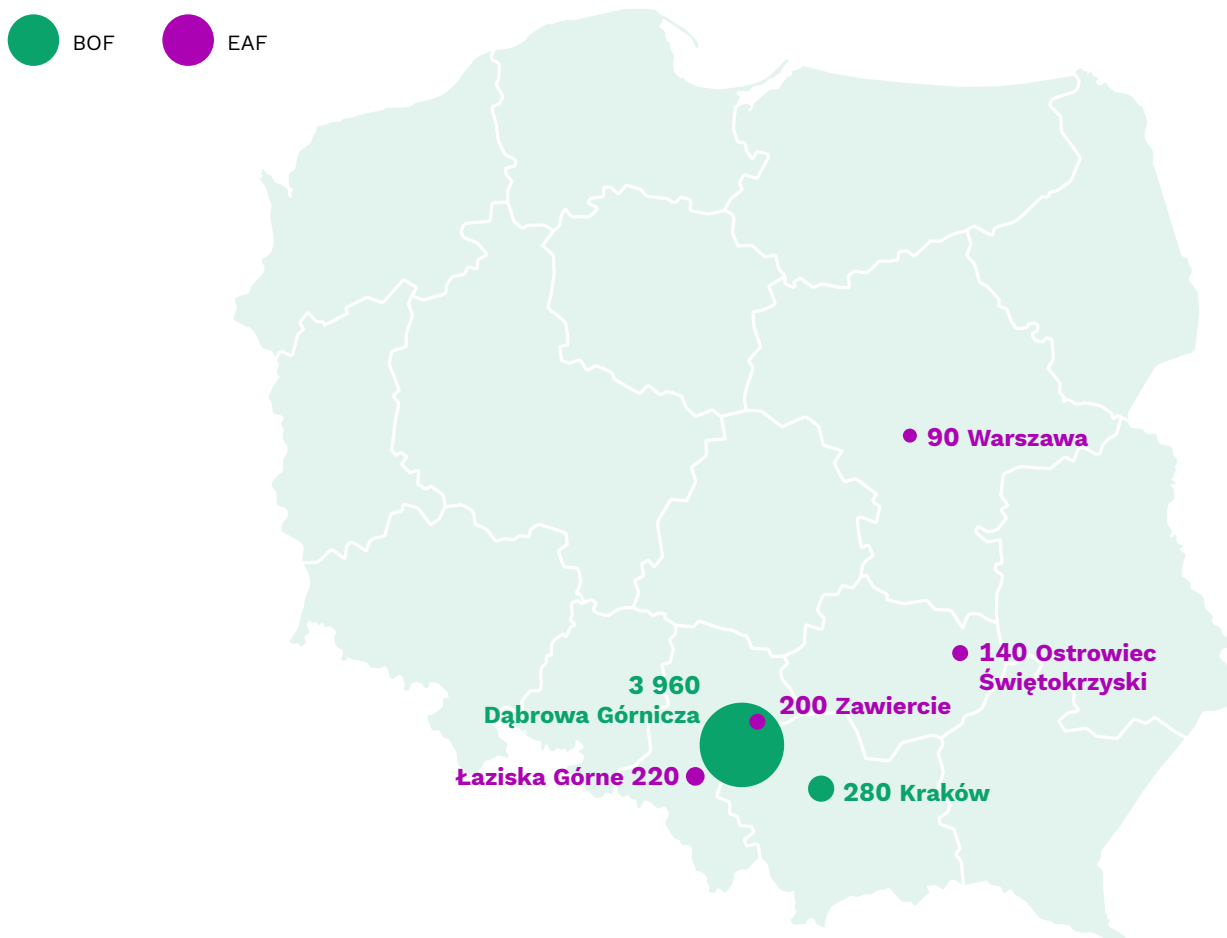
W Polsce stal w tej technologii produkuje huta ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej. Do niedawna wykorzystywała ją także huta tej firmy w Krakowie.

- **Łukowy piec elektryczny (EAF)** – piece elektryczne zasilane są energią elektryczną. Mogą one produkować pierwotną stal z żelaza gąbczastego (DRI), uzyskanego w procesie bezpośredniej redukcji rudy żelaza, jednak w Polsce w większości stosowane są do produkcji wtórnej stali w procesie przetopu złomu.

Metodą EAF pracują huty w Warszawie (ArcelorMittal Warszawa), Ostrowcu (Celsa Group), Zawierciu (CMC) i Częstochowie (Liberty Steel, przywrócona do działania po przerwie w latach 2019–2021 r.).

Udział stali wytwarzanej w obu technologiach w polskiej produkcji stali surowej w ostatniej dekadzie oscylował wokół 50% (Wolniak i in., 2020). Dominującą pozycję w produkcji stali w Polsce mają spółki z grupy ArcelorMittal. Do niej należy jedyna huta działająca w technologii BOF w Dąbrowie Górniczej, która w 2022 r. odpowiadała za blisko połowę krajowej produkcji surowej stali, oraz warszawska huta EAF (ArcelorMittal Warszawa).

### MAPA 3. Emisje CO<sub>2</sub> z hut stali w Polsce w 2020 r. według technologii (w tys. ton)



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie: Kościółek i in., 2023.

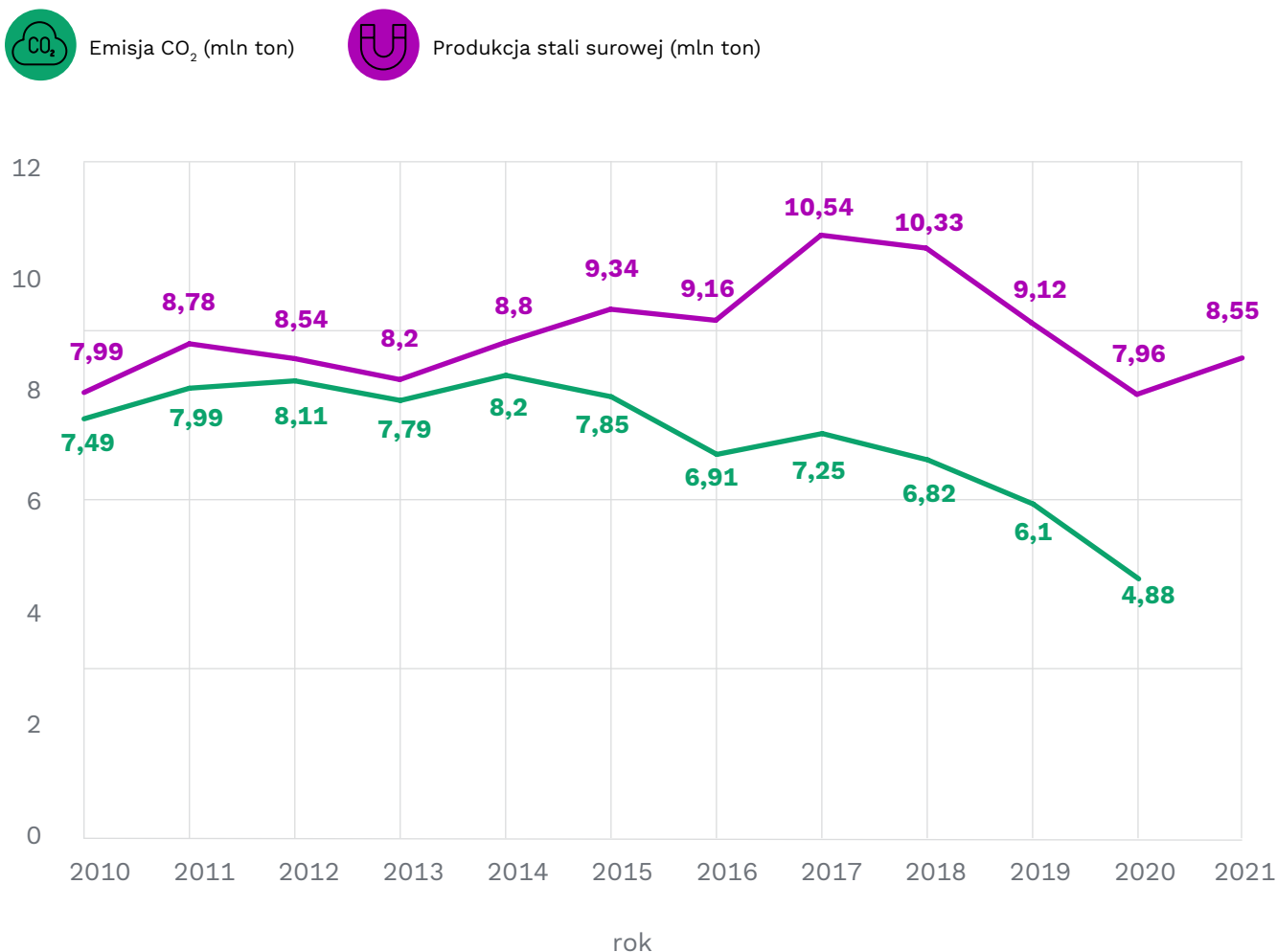
Na mapie nie oznaczono huty w Częstochowie, która była nieczynna w 2020 r., a wznowiła pracę w 2023 r. Oznaczona na mapie huta w Krakowie zakończyła działalność w 2020 r.

#### 3.2.2. UNIEZALEŻNIENIE WZROSTU PRODUKCJI OD WZROSTU EMISJI

W latach 2010–2020 w produkcji stali w Polsce doszło do uniezależnienia się produkcji od emisji (ang. *decoupling*) – produkcja rośnie lub utrzymuje się na stałym poziomie, mimo że emisje CO<sub>2</sub> spadają. Sektor stalowy<sup>10</sup> wyemitował w 2010 r. 7,5 mln ton CO<sub>2</sub>, a w 2020 r. – 4,9 mln ton CO<sub>2</sub>. Tymczasem produkcja surowej stali była na początku i końcu tego okresu bardzo zbliżona (ok. 8 mln ton rocznie). Po ograniczeniach spowodowanych pandemią Covid-19, produkcja stali w 2021 r. wzrosła. I to pomimo faktu, że w 2019 i 2020 r. zamknięto dwa duże zakłady. W 2019 r. przestała pracować Huta Częstochowa (Liberty Steel Group, 2023), a w 2020 r. zamknięto część surowcową huty w Krakowie należącej do ArcelorMittal.

<sup>10</sup> Sektor obejmuje PKD 24.10.Z – produkcja surowki, żelazostopów, żeliwa i stali oraz wyrobów hutniczych.

### WYKRES 13. Emisje CO<sub>2</sub> z przemysłu stalowego w Polsce w latach 2010–2020 i produkcja stali surowej w Polsce (mln ton)



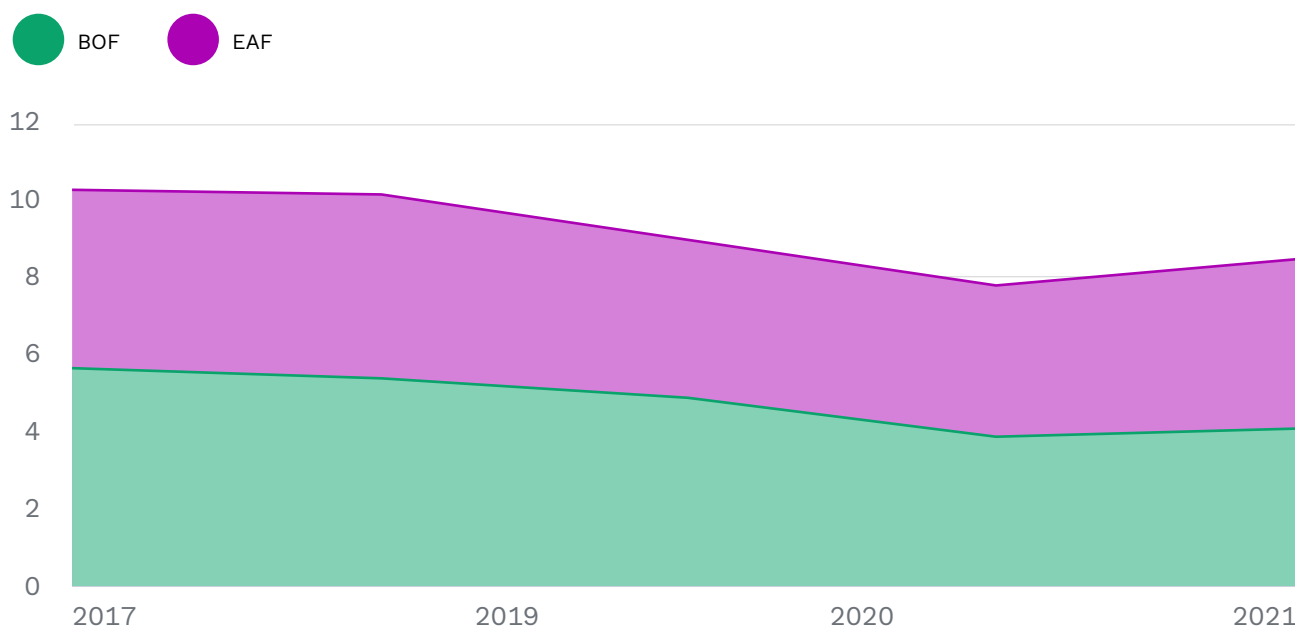
Źródło: opracowanie na podstawie danych GUS oraz Kościótek i in., 2023.

Sektor obejmuje podmioty należące do kategorii PKD 24.10.Z – produkcja surówki, żelazostopów, żeliwa i stali oraz wyrobów hutniczych ujętych w bazie Instrat według kryteriów zakwalifikowania do E-PRTR (Kościótek i in., 2023). Dane dla zakładów objętych bazą E-PRTR.

Uniezależnienie produkcji stali od emisji można wyjaśniać rekordowymi nakładami inwestycyjnymi w latach 2006–2009. Spowodowało to wzrost efektywności energetycznej oraz zużycia gazu ziemnego kosztem koksu i półkoksu w miksie paliwowym (Wolniak i in., 2020). Nie można tego natomiast wyjaśniać zmianą proporcji produkcji stali w niskoemisyjnym procesie elektrycznego pieca łukowego (EAF) kosztem produkcji z wykorzystaniem pieca tlenowego (BOF), które zmieniają się, ale nie w tak znaczącym stopniu (w latach 2017–2021 udział BOF wahał się w zakresie 48%–55%).



#### WYKRES 14. Produkcja stali surowej w Polsce w technologiach łukowego pieca elektrycznego (EAF) i pieca tlenowego (BOF) latach 2017–2021 (mln ton)



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie: HIPH, 2023.

### 3.2.3. TRZY OPCJE DLA DEKARBONIZACJI

Stal produkowana w technologii EAF jest mniej emisyjna. Piece łukowe zużywają znacznie mniej paliw kopalnych na potrzeby procesowe (Nimbalkar i in., 2015). W piecach tlenowych natomiast spala się paliwa kopalne, głównie koks. Są one wykorzystywane nie tylko jako źródło ciepła, ale też jako reduktor w procesie przetwarzania rudy żelaza w stal.

Ze względu na istotny udział emisji procesowych, technologia BOF jest trudniejsza do dekarbonizacji. Zwiększanie efektywności energetycznej i zamiana na mniej emisyjne paliwa ogranicza emisje, ale nie wyeliminuje ich. Aby doprowadzić produkcję stali do neutralności klimatycznej, konieczny jest wybór jednej z trzech opcji:

- 1 Porzucenie produkcji stali pierwotnej w technologii BOF na rzecz przetopu stali w obiegu zamkniętym w EAF.
- 2 Inwestycje w wychwytywanie i składowanie/wykorzystanie CO<sub>2</sub> emitowanego w hutach tlenowych.
- 3 Zmiana technologii produkcji stali pierwotnej na metody redukcji bezpośredniej (DRI) z wykorzystaniem zielonego wodoru, a przejściowo gazu ziemnego oraz elektrolizy bezpośredniej.

# 1 opcja

Obecnie system EU ETS wymusza dekarbonizację produkcji stali w niewielkim stopniu ze względu na alokację darmowych uprawnień do emisji dla przemysłu (Kobyłka i in., 2023, s. 11). Do 2034 r. mają one jednak zostać wygaszone. Produkcja stali jest też objęta węglowym podatkiem granicznym (CBAM), który będzie obciążał importerów stali spoza UE koniecznością opłat za emisje proporcjonalnie do systemu ETS (Komisja Europejska).

## **Koszt porzucenia produkcji stali w technologii BOF**

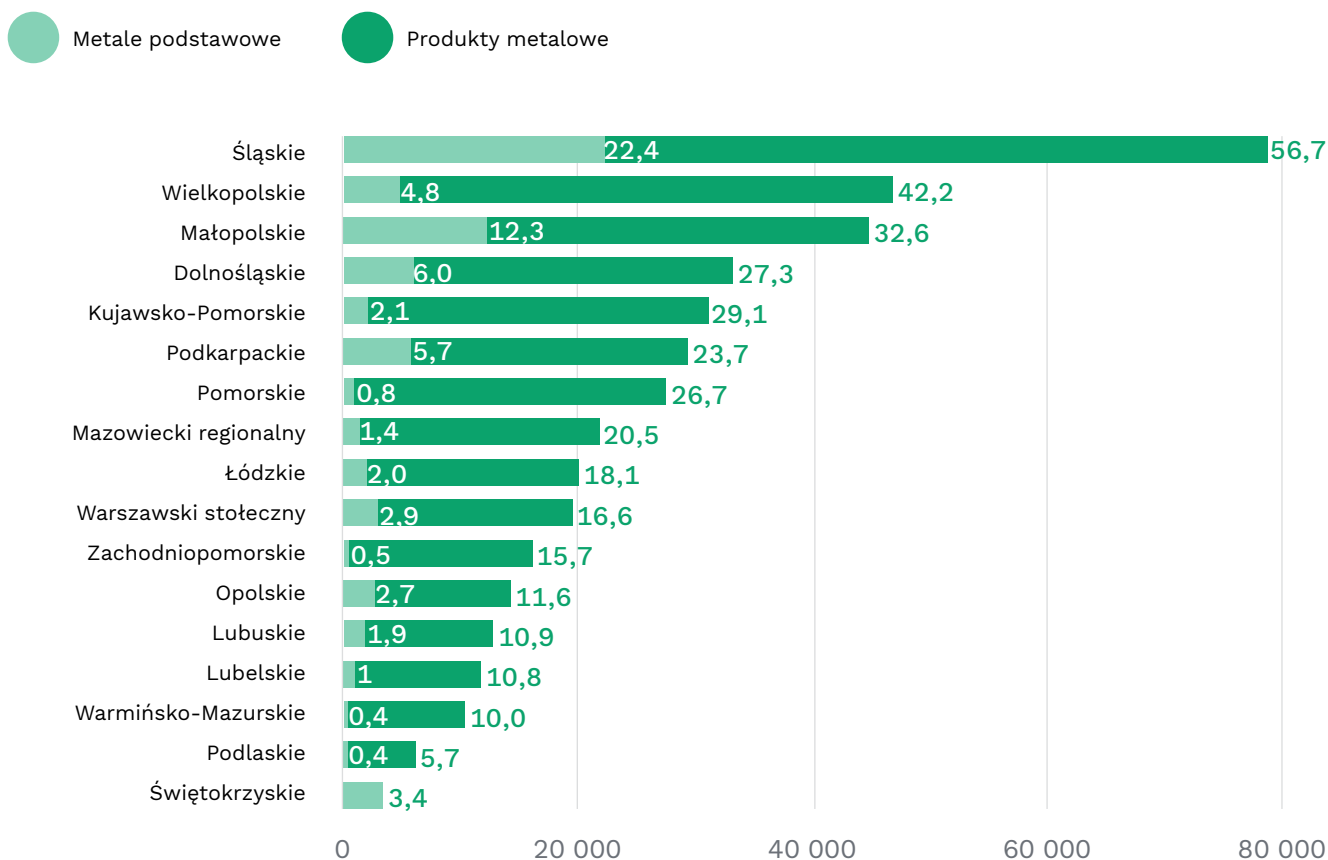
Porzucenie produkcji stali w technologii BOF, bez jednoczesnego zastąpienia jej inną metodą, oznaczałoby spadek wolumenu produkcji stali w Polsce o ok. połowę. Wiąże się to z utratą wartości dodanej i zmniejszeniem liczby miejsc pracy oraz koniecznością importu tego surowca, prawdopodobnie z krajów o wyższej jednostkowej emisyjności.

O ile produkcja stali w Polsce ma w polskiej gospodarce znaczenie podobne jak w całej Unii Europejskiej, to już kolejny etap łańcucha wartości – produkcja wyrobów metalowych – jest dla polskiej gospodarki bardzo ważna. Z końcem 2022 r. Polska zajmowała 23. miejsce na świecie pod względem produkcji stali surowej (World Steel Association, 2023) wobec 21. miejsca na świecie pod względem PKB (Bank Światowy, 2023). Udział produkcji metali podstawowych (obejmujący nie tylko stal) w wartości dodanej w polskiej gospodarce wyniósł w 2020 r. 0,4%, czyli tuż poniżej 0,5% w całej Unii Europejskiej (Eurostat, 2023a). Tymczasem udział branży wytwarzania produktów z metalu (wyłączając maszynię i narzędzia) stanowił w 2020 r. 2,4% wartości dodanej w polskiej gospodarce, podczas gdy ostatnia znana wartość dla całej UE z 2019 r. to 1,4%.

Wytwarzanie stali i produktów z metalu to branże powiązane. Wiele wyrobów metalowych wytwarza się w tych samych zakładach, w których wytopiana jest stal. Połączone zatrudnienie w obu sektorach w samym województwie śląskim wyniosło w 2020 r. blisko 80 tys. osób (Eurostat, 2023b).

Los przedsiębiorstw z sektora przetwórstwa metalurgicznego nie jest jednak nieodłącznie związany z produkcją stali w Polsce. W przypadku spadku wolumenu krajowej produkcji, branża ta mogłaby poszukiwać dodatkowych źródeł surowca poza Polską. Nie jest jednak pewne, czy takie rozwiązanie nie wiązałoby się ze wzrostem kosztów i spadkiem rentowności produkcji.

**WYKRES 15. Liczba osób zatrudnionych w sektorze wytwarzania metali podstawowych oraz wytwarzania produktów z metali (z wyłączeniem maszynarii i narzędzi) w 2020 r. w jednostkach NUTS3**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie danych: Eurostat, 2023.

Zachętą do utrzymania i dalszego rozwoju produkcji stali są prognozy jej zużycia w kolejnych latach. Globalne zapotrzebowanie na stal do 2050 r. może wzrosnąć nawet o 20–30% (IEA, 2020). Wzrost dotyczyć będzie także kluczowych z punktu widzenia transformacji energetycznej sektorów, takich jak produkcja turbin wiatrowych czy samochodów elektrycznych.

Jednocześnie istnieje potencjał zwiększenia wykorzystania złomu, który można przetapiać na stal w piecach elektrycznych EAF (w miejsce lub obok utrzymania produkcji w piecach tlenowych BAF). UE jest obecnie eksporterem netto złomu żelaznego. W 2021 r. eksport złomu żelaznego poza UE wyniósł 19,5 mln ton, głównie do Turcji, a także Wielkiej Brytanii, Indii, Egiptu i Szwajcarii (Eurostat, 2022). Wolumen eksportu rósł od 2015 r. Oznacza to, że na rynku europejskim jest wysoka podaż złomu, który można przetwarzać w zieloną stal w zelektryfikowanych piecach.

Produkcja stali metodą EAF jest niskoemisyjna, czyli w znacznie mniejszym stopniu obciążona opłatami za emisję. Proces ten może być konkurencyjny cenowo także poza UE. Łatwiej też – ze względu na rozmiary emisji generowanych w tym procesie – poddać je sekwestracji lub wykorzystywać w innych procesach.

## 2 opcja

### CCS w produkcji stali

Jedną z propozycji ograniczenia emisji z produkcji stali w emisyjnych piecach BOF jest wychwyty i składowanie lub wykorzystanie emitowanego CO<sub>2</sub>. Problem stanowią jednak skala i koszty takich inwestycji. Jedyna działająca w Polsce huta BOF znajduje się w Dąbrowie Górniczej. Projekty, które umożliwiłyby składowanie CO<sub>2</sub> pod ziemią na terenie kraju są jednak na bardzo wczesnym etapie. Nie istnieje też infrastruktura pozwalająca transportować CO<sub>2</sub> z województwa śląskiego do portów morskich, którymi gaz mógłby być transportowany do składowisk w morzu. Jednocześnie o składowanie CO<sub>2</sub> pod ziemią będą rywalizowały inne branże, w których uniknięcie emisji procesowych jest trudniejsze, np. branża cementowa.

Dla produkcji stali, inaczej niż np. dla cementu portlandzkiego, istnieją jednak alternatywy procesowe.

## 3 opcja

### Zielone metody produkcji stali

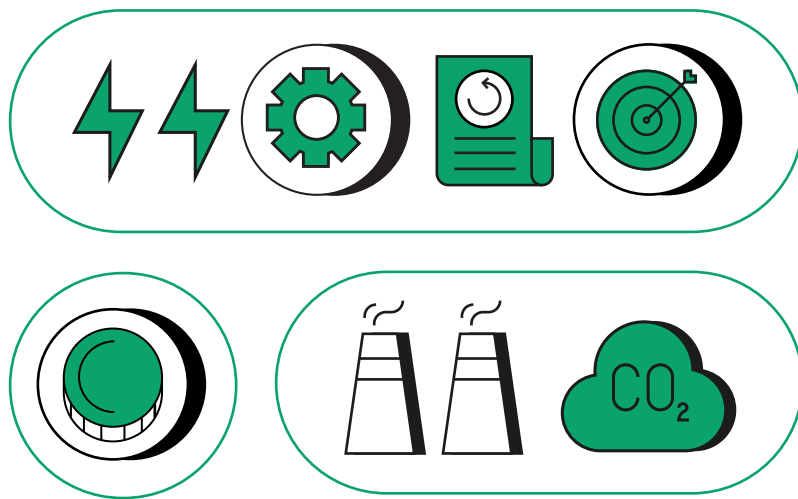
Alternatywą wobec opartej na koksie technologii produkcji stali z rudy żelaza jest **metoda redukcji bezpośredniej** (ang. *directly-reduced iron*, DRI). W obecnie działających hutach DRI w charakterze reduktora wykorzystuje się gaz ziemny, ale można zastępować go zielonym wodorem. Po przejściu na wodór w miejsce gazu ziemnego, ta technologia jest neutralna emisyjnie (Agora Industry i in., 2022).

Opartą o gaz ziemny metodę DRI wykorzystują huty w regionach, w których ten surowiec jest tani – to głównie kraje Zatoki Perskiej i Afryki Północnej (Agora Energiewende, 2023). W Europie, m.in. w Niemczech, trwają projekty uruchomienia hut stali opartych o DRI zasilanych zielonym wodorem w zakładach thyssenKrupp w Duisburgu (Reuters, 2023) czy ArcelorMittal w Hamburgu (ArcelorMittal). Trwa też pilotażowy projekt w Luleå w Szwecji (Hybrit, 2023).

Największą trudnością w rozwinięciu bezemisyjnych procesów DRI jest podaż dużych wolumenów zielonego wodoru w umiarkowanej cenie. *Polska Strategia Wodorowa* zakłada na 2030 r. ambitne cele w zakresie produkcji blisko 200 tys. ton wodoru z instalacji o mocy 2 GW. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że perspektywa nadwyżek energii elektrycznej w sieci w 2030 r. jest znikoma w związku ze strukturalnym niedoborem mocy w wyniku odstawień elektrowni węglowych i niskimi ambicjami kraju w zakresie budowy nowych mocy OZE (MKiŚ, 2021; Swoczyna, 2023b). Polska nie prowadzi wielkoskalowych projektów produkcji zielonego wodoru, obecnie działa jedynie niewielki projekt ZE PAK przy Elektrowni Konin (ZE PAK, 2021).

Inna alternatywna technologia produkcji zielonej stali to **bezpośrednia elektroliza**. W tej technologii tlen jest usuwany z rudy bez udziału dodatkowego reduktora. Produkowana w tej technologii stal jest czystsza od uzyskiwanej w innych metodach (World Steel Association).

Uruchomienie huty pracującej w tej technologii zapowiada ArcelorMittal, choć nie podał jeszcze publicznie lokalizacji planowanego zakładu (Myszor, 2023). Przewagami bezpośredniej elektrolizy są skalowalność, możliwość pracy z rudami niższej jakości i to, że do działania procesu niezbędne są tylko ruda żelaza i elektryczność (The Economist, 2023). Nie jest to jednak jeszcze technologia stosowana na przemysłową skalę.



# 4. Zielony szok inwestycyjny – modelowanie efektów makroekonomicznych

## 4.1. Założenia modelowania i dane wejściowe

Aby zrozumieć wpływ zmian w zakresie źródeł wytwarzania energii oraz technologii produkcji w sektorach energochłonnych, zastosowaliśmy modelowanie makroekonomiczne. W pierwszej kolejności opracowaliśmy model przepływów międzygałęziowych (input–output) dla polskiej gospodarki. Celem tego modelu było zobrazowanie wpływu pozytywnego szoku makroekonomicznego, wynikającego ze zwiększenia inwestycji w transformację energetyczną (zwłaszcza w OZE), na najważniejsze wielkości makroekonomiczne – wielkość popytu wewnętrznego, wartość dodaną oraz zatrudnienie (także w sektorach energochłonnych).

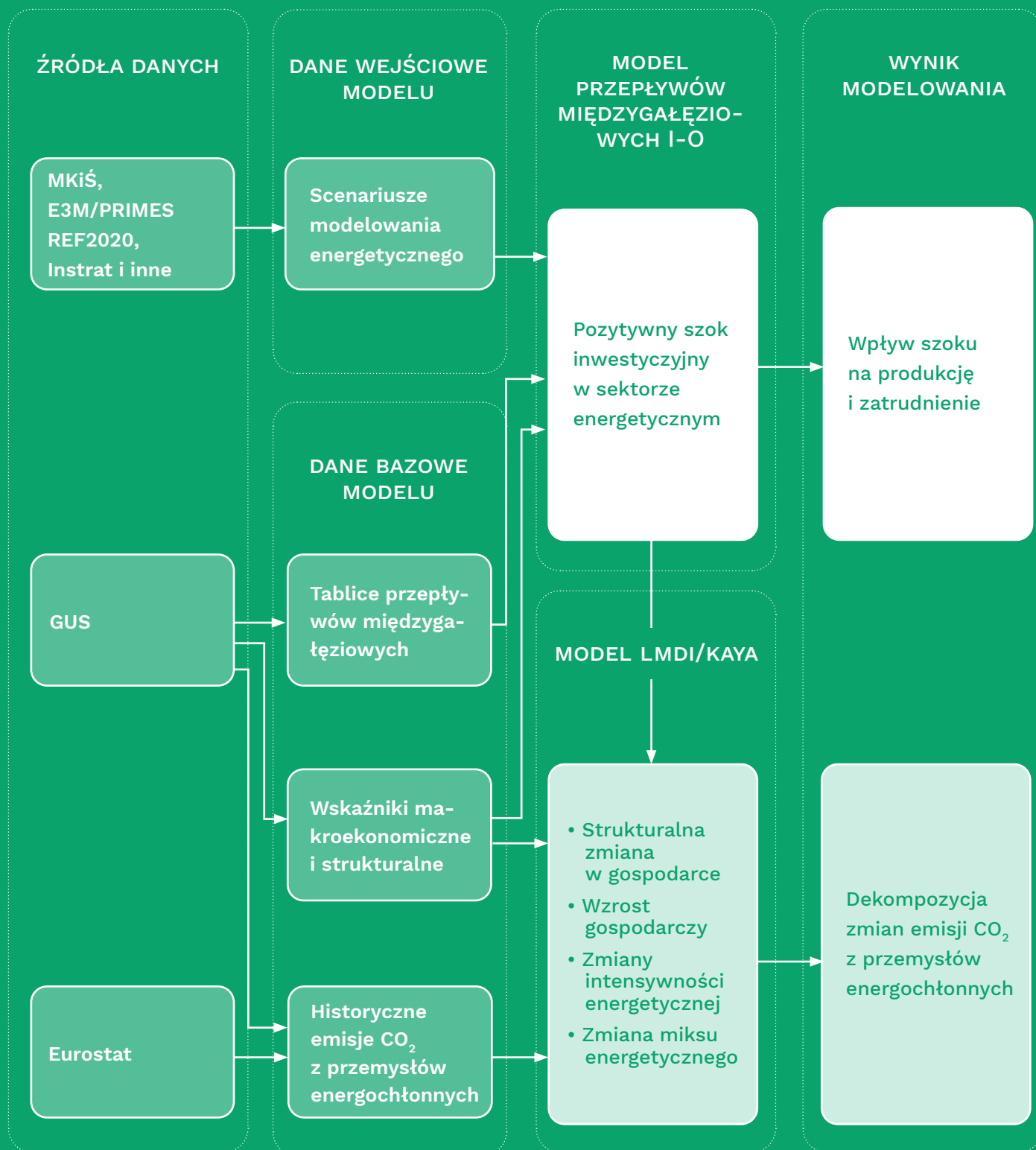
Pozytywny szok inwestycyjny został zdefiniowany jako różnica w wartościach inwestycji w transformację energetyczną pomiędzy scenariuszem referencyjnym Komisji Europejskiej PRIMES REF2020 (E3M, 2021) a bardziej ambitnym scenariuszem rządowym zawartym w *Polityce energetycznej Polski do 2040 r.* w wersji opublikowanej w 2023 r. (MKiŚ, 2023). Poza danymi z wymienionych scenariuszy, w modelowaniu wykorzystaliśmy również dane GUS oraz Eurostatu.

W drugim kroku opracowany został model oparty na metodologii LMDI/KAYA, którego celem była dekompozycja czynników wpływających na redukcję emisji CO<sub>2</sub> w sektorach energochłonnych. Aby uprościć interpretację, obliczono wskaźnik podziału logarytmicznego (LMDI) (Ang, 2004). Następnie wybrano addytywny schemat dekompozycji jako bardziej odpowiedni w przypadku analizy ilościowej (Ang, 2015). Zastosowane zostały również wyniki z wcześniejszego modelowania makroekonomicznego za pomocą modelu przepływów międzygałęziowych.

Dekompozycja LMDI/KAYA przedstawia wyniki rozkładu zmian emisji CO<sub>2</sub> w przemysłach energochłonnych na skutek zmian:

- wartości dodanej wytwarzanej w tych przemysłach,
- struktury wartości dodanej wytwarzanej w tych przemysłach,
- energochłonności tych przemysłów,
- zmian emisyjności miksu energetycznego w tych przemysłach.

**SCHEMAT 1. Modelowanie makroekonomiczne input–output (I–O) oraz LMDI/KAYA**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I–O & LMDI/KAYA.

Innymi słowy, dekompozycja LMDI/KAYA pozwala na określenie stopnia, w jakim każdy ze wskazanych wyżej czynników przyczynił się do zmian wielkości emisji CO<sub>2</sub> zarówno historycznie, jak i w modelowanym zakresie czasu.

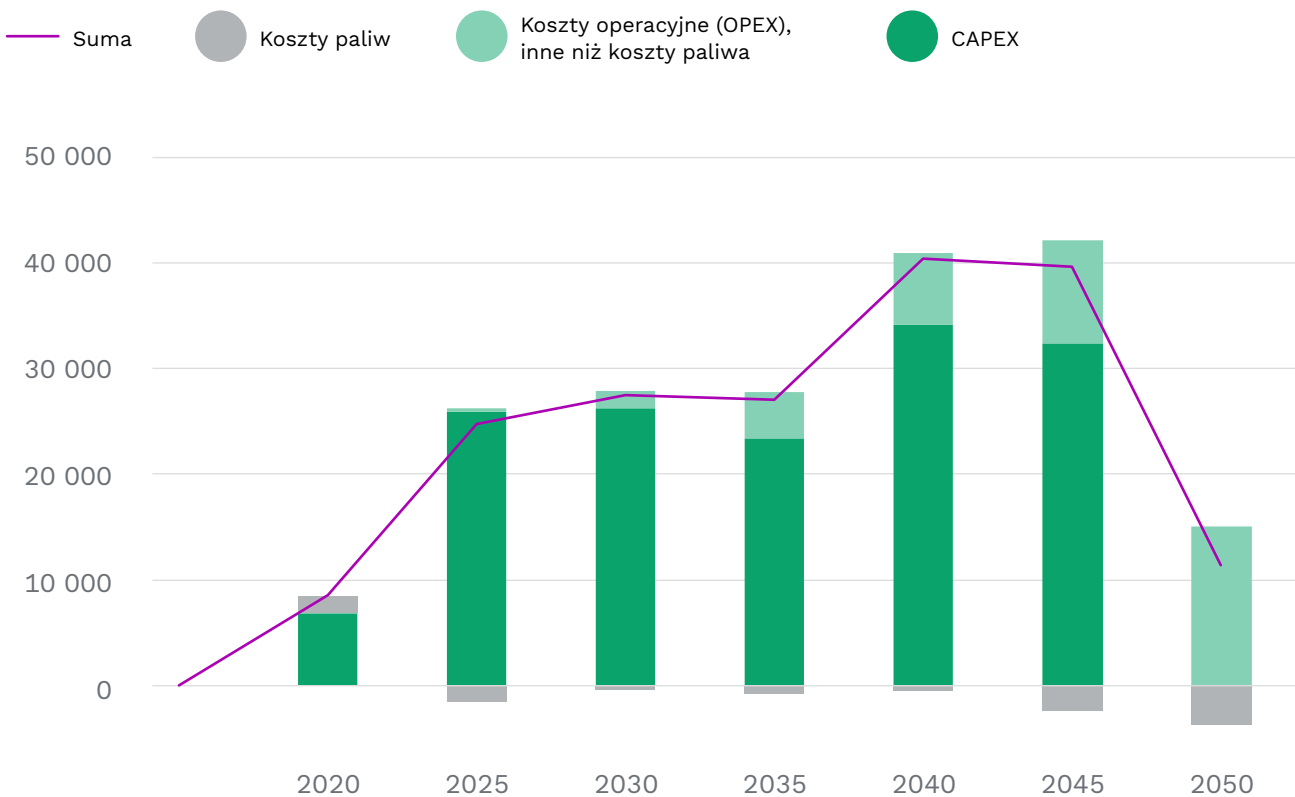
Techniczny opis zastosowanej metodologii znajduje się w aneksie zamieszczonym na końcu niniejszego raportu.

## 4.2. Pozytywny szok inwestycyjny – jak zwiększenie inwestycji w transformację energetyczną wpłynie na polską gospodarkę i sektory energochłonne

Pozytywny szok inwestycyjny został zdefiniowany jako różnica pomiędzy scenariuszami KE/E3M oraz MKiŚ/PEP2040 w wartości poniesionych:

- nakładów inwestycyjnych na transformację energetyczną (CAPEX),
- kosztów operacyjnych (OPEX), innych niż koszty paliwa,
- kosztów paliwa.

**WYKRES 16. Wartość pozytywnego szoku inwestycyjnego w podziale na koszty inwestycji, koszty utrzymania nowych inwestycji oraz koszty paliw (mln zł w cenach stałych z 2015 r.) w latach 2020–2050**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I-O & LMDI/KAYA.

Wartości przedstawiają uśrednione nakłady w pięcioletnich okresach, np. wartość dla 2020 r. przedstawia uśrednione nakłady dla lat 2020–2024.



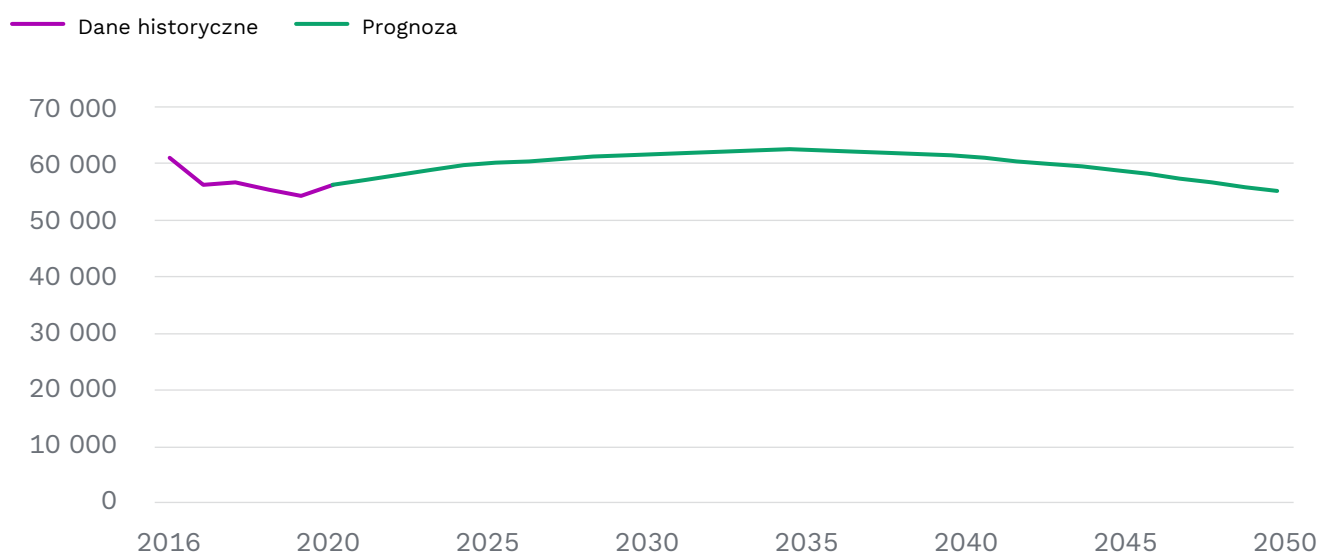
Wartość szoku będzie stopniowo rosła do 2050 r. W ogromnej większości jest to wartość nowych inwestycji. W całym okresie modelowania szoku zwiększać się również będą koszty spowodowane utrzymaniem nowych inwestycji energetycznych. Te koszty będą jednak częściowo równoważone przez oszczędności generowane poprzez mniejszą niż w scenariuszu bazowym konsumpcję paliw kopalnych.

Roczna wartość pozytywnego szoku (liczona w cenach stałych z 2015 r.) nie będzie przekraczała 10 mld zł w latach 2020–2024, natomiast później wyraźnie wzrośnie i będzie utrzymywała się w przedziale 25–30 mld zł w latach 2025–2035. Następnie wartość szoku w ujęciu rocznym przekroczy 40 mld zł w latach 2040–2049. Do 2035 r. za niemal całość wartości szoku będą odpowiadały większe nakłady inwestycyjne, natomiast od tego roku wyraźnie wzrastają koszty utrzymania nowych mocy.

Realna wielkość szoku (mierzona w stosunku do wielkości całej gospodarki) w latach 2025–2040 będzie jednak spadać ze względu na wzrost gospodarczy. Udział tych nakładów w gospodarce rośnie nie tylko w latach 2020–2025, ale także w latach 2040–2050. Scenariusz zakłada, że do 2050 r. wszystkie inwestycje w transformację energetyczną zostaną już dokonane i pozostaną wówczas jedynie koszty utrzymania infrastruktury.

Na potrzeby modelowania makroekonomicznego opracowaliśmy prognozę wartości dodanej generowanej przez wszystkie sektory gospodarki w scenariuszu pozytywnego szoku. Zakładamy, że sektory energochłonne będą zwiększały wytwarzaną wartość dodaną do 2035 r. Będzie ona wówczas o 12% wyższa niż w 2019 r. Następnie wartość dodana zacznie powoli spadać, głównie na skutek silnego ograniczania produkcji w sektorze wytwarzania i przetwarzania koksu oraz produktów rafinacji ropy naftowej. W 2050 r. wartość dodana generowana przez sektory energochłonne wróci do poziomu z 2019 r.

### WYKRES 17. Prognoza wartości dodanej generowanej przez sektory energochłonne w scenariuszu pozytywnego szoku inwestycyjnego w energetyce (mln zł w cenach stałych z 2015 r.)



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I-O & LMDI/KAYA.

Szok pozytywnie przełoży się na produkcję tych sektorów zarówno kanałem podażowym, a więc poprzez obniżenie kosztów produkcji, jak i kanałem popytowym.

Wyniki modelowania makroekonomicznego input–output wskazują także, że na skutek szoku zatrudnienie w sektorach energochłonnych może wzrosnąć o ponad 3 tys. pracowników już od 2026 r. W następnych latach dodatkowe zatrudnienie będzie nieco niższe (do 2040 r. będzie przekraczało 2 tys. osób), natomiast po 2040 r. ponownie wzrośnie. W 2050 r. zatrudnienie w sektorach energochłonnych będzie wyższe o prawie 3 tys. pracowników, co oznacza wzrost o ok. 0,8% względem 2019 r.

Oba wyraźne wzrosty zatrudnienia będą efektem wzrostu nakładów inwestycyjnych (CAPEX) na transformację energetyczną. Pierwszy z nich ma miejsce pomiędzy latami 2020–2025 i 2025–2030, a drugi pomiędzy latami 2035–2040 i 2040–2045. Wzrost tych nakładów spowoduje wzrost popytu na produkty wytwarzane przez sektory energochłonne, zwłaszcza sektor produkcji metali (elementy konstrukcyjne, maszyny i urządzenia) oraz sektor produkcji wyrobów z pozostałych surowców niemetalicznych (cement). Wyższy popyt przełoży się na zwiększenie zatrudnienia w tych sektorach. Po początkowych silnych wzrostach, CAPEX będzie lekko spadał, a wraz z nim popyt oraz zatrudnienie w sektorach energochłonnych.

Na skutek zielonego szoku inwestycyjnego nie zmieni się istotnie efektywność produkcji w tych sektorach, mierzona jako wartość dodana w przeliczeniu na pracownika.

**WYKRES 18. Prognoza zmian zatrudnienia w sektorach energochłonnych na skutek zmian produkcji w scenariuszu pozytywnego szoku inwestycyjnego (tys. zatrudnionych)**



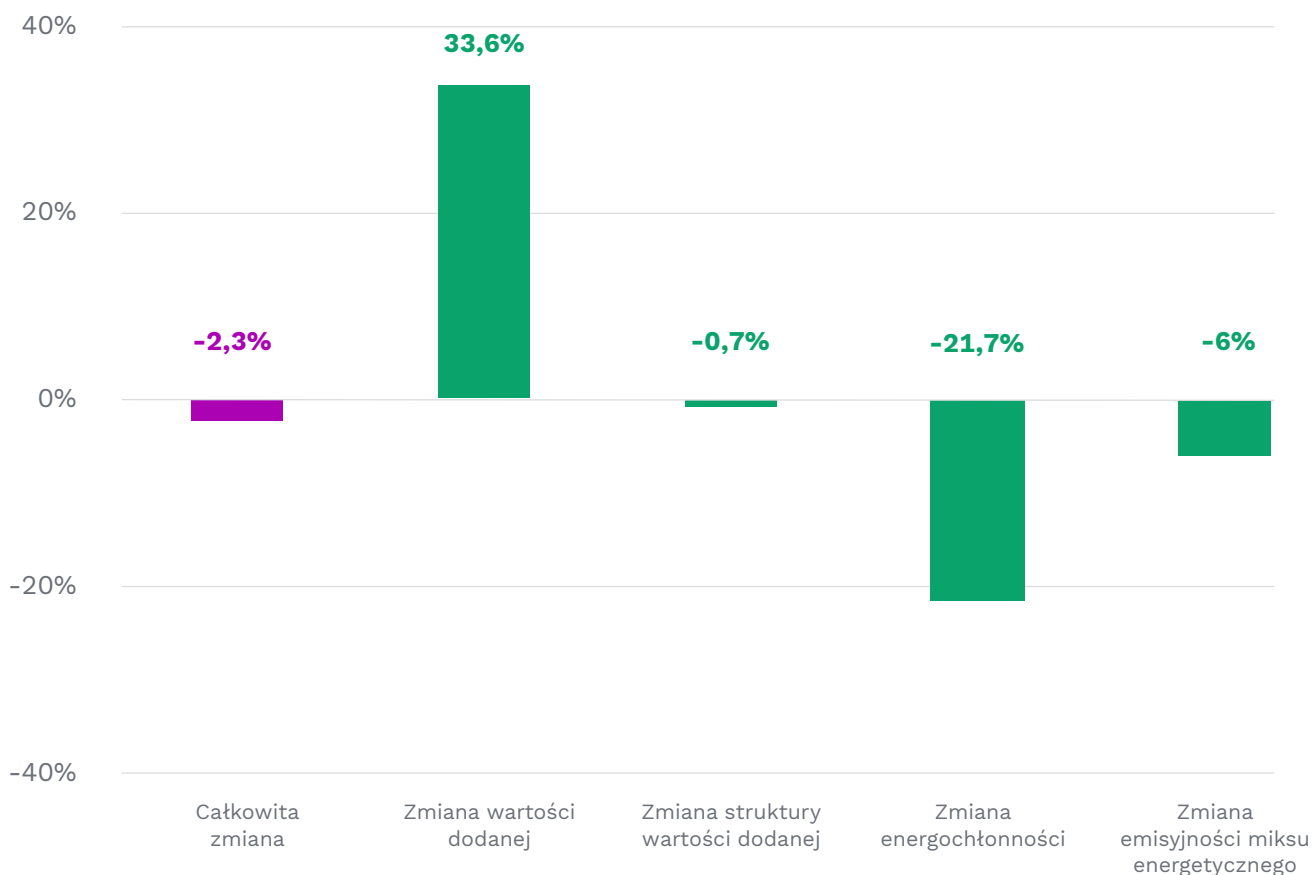
Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I–O & LMDI/KAYA.

### 4.3. Ścieżki dekarbonizacji – wyniki modelowania scenariuszy redukcji emisji do 2050 r.

Bazując na wynikach modelowania makroekonomicznego input–output, dokonaliśmy dekompozycji emisji CO<sub>2</sub> sektorów energochłonnych. Jej celem było zbadanie wpływu, jaki na wielkość emisji wywarły w modelowanym okresie poszczególne czynniki: zmiana wartości dodanej generowanej w tych sektorach, zmiany w strukturze tej wartości dodanej, zmiany w energochłonności oraz emisyjności miksu energetycznego tych przemysłów.

Dekompozycja zmian emisji CO<sub>2</sub> została dokonana dla dwóch okresów. Pierwszym z nich są lata 2012–2021, dla których dostępne były dane GUS o emisjach energetycznych i procesowych w zakresie 1 (na miejscu) oraz o zużyciu energii. Drugim są lata 2021–2050, dla których przyjęliśmy założenia w zakresie poprawy energochłonności i emisyjności zużycia energii, a także wykorzystaliśmy prognozy wartości dodanej generowanej przez te sektory opracowane w ramach modelu input–output.

**WYKRES 19. Dekompozycja zmian emisji CO<sub>2</sub> sektorów energochłonnych w latach 2012–2021 (jako procentowa wartość spadku emisji względem 2012 r.)**



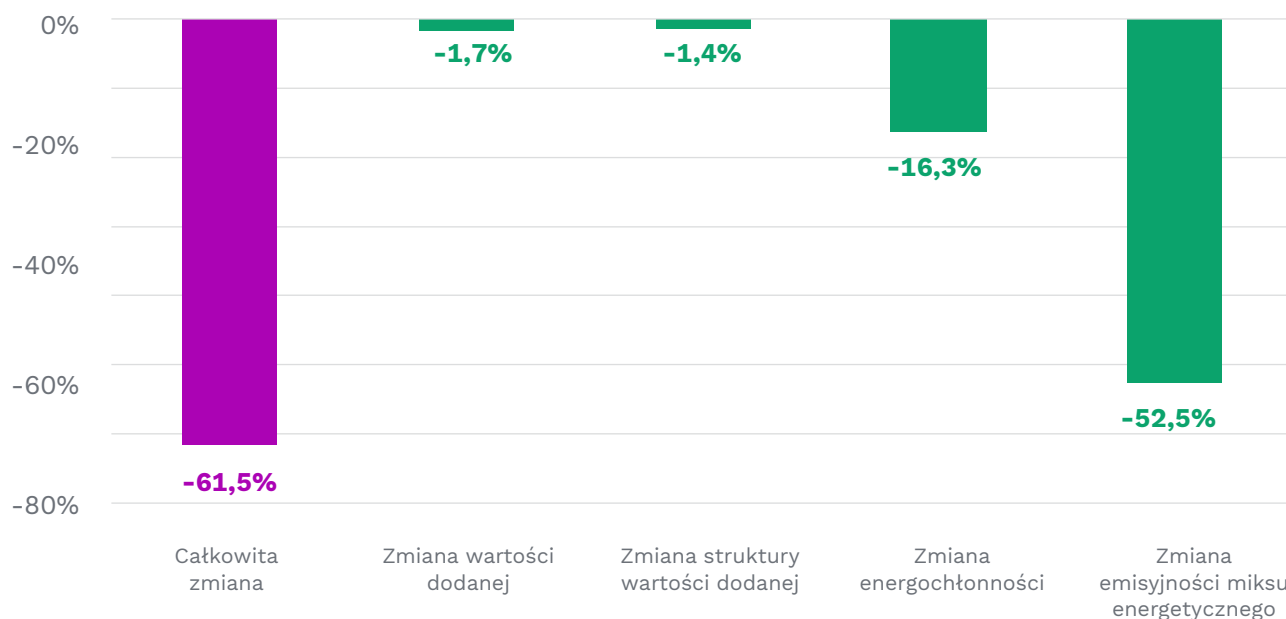
Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I-O & LMDI/KAYA.

W latach 2012–2021 wielkość emisji CO<sub>2</sub> sektorów energochłonnych spadła o 2,3%, osiągając na koniec okresu 46,4 mln ton CO<sub>2</sub>. W tym czasie wartość dodana generowana przez te sektory wzrosła jednak o 33,6%. Wzrost emisji wynikających ze wzrostu wartości dodanej był równoważony przede wszystkim znaczącą poprawą energochłonności. Przełożyła się ona na spadek emisji o 21,7%. Spadek emisyjności zużycia energii obniżył z kolei emisje o 6%. Następnie zmiany w strukturze wytwarzania wartości dodanej obniżyły emisje sektorów energochłonnych o 0,7%.

W latach 2012–2021 nastąpiło więc uniezależnienie się dynamiki produkcji sektorów (mierzonej jako wartość dodana) od dynamiki emisji CO<sub>2</sub> (ang. *decoupling*). Zjawisko obserwowane w sektorze stali (zob. dział 3.2.2.) było charakterystyczne także dla innych sektorów energochłonnych, choć przybierało inne oblicza. W przypadku stali, utrzymaniu produkcji towarzyszył spadek emisji absolutny. W pozostałych sektorach wzrostowi produkcji towarzyszyło utrzymanie produkcji na w miarę stabilnym poziomie.

Jest to zjawisko pozytywne, ponieważ pokazuje, że możliwe jest zwiększanie produkcji w tych sektorach, bez jednoczesnego zwiększania emisji absolutnych. Z drugiej jednak strony, absolutna wartość emisji sektorów energochłonnych w 2021 r. była niewiele niższa niż w 2012 r., co oznacza, że w tym czasie analizowane sektory niemal nie poczyniły progresu w zakresie realizacji celów klimatycznych.

**WYKRES 20. Dekompozycja prognozy zmian emisji CO<sub>2</sub> sektorów energochłonnych w latach 2021–2050 (jako procentowa wartość spadku emisji względem 2021 r.) w scenariuszu pozytywnego szoku inwestycyjnego**



Źródło: opracowanie Instrat na podstawie modelu makroekonomicznego I-O & LMDI/KAYA.

W latach 2021–2050 emisje sektorów energochłonnych w naszym modelowaniu spadają o 61,5%. Dzieje się to przy niewielkim spadku wartości dodanej generowanej przez te sektory, który ma wynieść 1,7%. W 2012 r. każdy 1 mln zł wartości dodanej wytworzonej w sektorach energochłonnych wiązał się średnio z emisją 1090 ton CO<sub>2</sub>. W 2021 r. było to 797 ton CO<sub>2</sub>. W 2050 r. liczba ta spadnie do 313 ton.

Głównym motorem redukcji emisji będzie spadek emisyjności energii, który wyniesie 52,5%. Zmniejszenie energochłonności analizowanych przemysłów zredukuje emisje o 16,3%, a zmiana w zakresie struktury produkcji spowoduje spadek o dalsze 1,4%.

Najważniejszy pojedynczy czynnik obniżający emisje będzie więc inny niż w latach 2012–2021. Wtedy sektory energochłonne zmodernizowały swoje zakłady produkcyjne, co skutkowało niższym zużyciem energii w przeliczeniu na wytwarzaną wartość dodaną. Jednocześnie jednak w bardzo niewielkim stopniu zmieniała się emisyjność energii, co wynikało w głównej mierze z niewielkiej poprawy emisyjności miksu energetycznego w całej gospodarce.

W latach 2021–2050 emisyjność wytwarzania energii powinna się znacznie zmniejszyć na skutek transformacji energetycznej i ogromnego zwiększenia mocy zainstalowanej w OZE. Jednocześnie modernizacja technologii produkcji przemysłowej nadal będzie postępować, choć nie będzie ona tak szybka jak w latach 2012–2021.

Warto też zwrócić uwagę, że utrzymanie wartości dodanej w 2050 r. na poziomie podobnym do 2021 r., będzie oznaczało bardzo istotny spadek udziału sektorów energochłonnych w całej gospodarce, co będzie wynikało ze wzrostu gospodarczego. W 2021 r. udział tych czterech sektorów w polskiej gospodarce, mierzony wartością dodaną, wyniósł 2,9%. W 2050 r. spadnie on natomiast do 1,6%.

## **OGRANICZENIA ZASTOSOWANEJ METODY BADAWCZEJ**

Należy także pamiętać, że opracowane przez nas modelowanie dekompozycji emisji CO<sub>2</sub> przy użyciu metody LMDI/KAYA ma też swoje ograniczenia. Po pierwsze, model tylko częściowo uwzględnia postęp w zakresie technologii produkcji, a co za tym idzie, spadek energochłonności analizowanych przemysłów. Nie uwzględnia to na przykład możliwości uruchomienia neutralnej emisyjnie technologii wytwarzania stali w metodzie DRI czy zastosowania technologii wychwytu i składowania CO<sub>2</sub> (CCS/CCUS) generowanego przez sektory energochłonne. Po drugie, model nie uwzględnia zmian w otoczeniu regulacyjnym, które mogą skutkować zamknięciem czy silnym ograniczeniem działalności wybranych przemysłów. Po trzecie, model zakłada stałą, liniową poprawę w zakresie emisyjności energii. Wreszcie, modelowanie bazuje na prognozie wartości dodanej generowanej przez sektory, opracowanej przy pomocy modelu przepływów międzygałęziowych, której ograniczenia zostały opisane w tym rozdziale.

# Bibliografia

- Agora Energiewende. Global Steel Transformation Tracker. <https://www.agora-energiewende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/> (9.06.2023).
- Agora Industry, FutureCamp, Wuppertal Institute, Ecologic Institute. (2022). *Transforming industry through carbon contracts. Analysis of the German steel sector*. <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/transforming-industry-through-carbon-contracts-steel/> (28.09.2023).
- ArcelorMittal. (2022). *ArcelorMittal Poland na stałe zamknie część surowcową krakowskiej huty*. <https://poland.arcelormittal.com/media/aktualnosci/artukul/arcelormittal-poland-na-stale-zamknie-czesc-surowcowa-krakowskiej-huty> (6.10.2023).
- ArcelorMittal. *Hydrogen-based steelmaking to begin in Hamburg*. <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg> (28.09.2023).
- Ang. B. W. (2004). *Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?*, Energy Policy vol. 32/2004.
- Ang. B. W. (2015). *LMDI decomposition approach: A guide for implementation*, Energy Policy vol. 86/2015.
- Bank Światowy. (2023). *Gross domestic product 2022*. [https://databankfiles.worldbank.org/public/ddpext\\_download/GDP.pdf](https://databankfiles.worldbank.org/public/ddpext_download/GDP.pdf)
- Beyond Zero Emissions. (2017). *Zero Carbon Industry Plan. Rethinking Cement*. [https://bze.org.au/research\\_release/rethinking-cement/](https://bze.org.au/research_release/rethinking-cement/) (17.01.2023).
- E3M. (2021). *Reference Scenario 2020 (REF 2020)*. Primes Ver. 6 Energy Model. [https://energy.ec.europa.eu/document/download/1485062e-2d65-47cb-887a-a755edc2ec36\\_en?filename=ref2020\\_energy-transport-ghg.xlsx](https://energy.ec.europa.eu/document/download/1485062e-2d65-47cb-887a-a755edc2ec36_en?filename=ref2020_energy-transport-ghg.xlsx) (11.05.2023).
- Elźbieciak, T. (2022). *Energetyka i cementownie szykują się do inwestycji w CCS*. Wysokie napięcie. <https://wysokienapiecie.pl/72564-energetyka-i-cementownie-szykuja-sie-do-inwestycji-w-ccs/> (6.10.2023).
- Elźbieciak, T., Skłodowska, M. (2023). *Gigawaty nowych mocy z OZE dla przemysłu stają się realne*, Wysokie Napięcie, <https://wysokienapiecie.pl/91443-gigawaty-nowych-mocy-z-oze-dla-przemyslu-staja-sie-realne/> (25.08.2023).
- Elźbieciak, T., Zasuń, R. (2023). *Przemysł nie może się doczekać obiecanych miliardów*, Wysokie Napięcie, <https://wysokienapiecie.pl/92208-przemysl-nie-moze-sie-doczekac-obiecanych-miliardow/> (19.09.2023).
- Eurostat. (2022). *EU trade in recyclable raw materials is on the rise*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220510-1> (9.06.2023).
- Eurostat. (2023). *National accounts aggregate by industry*. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/088bed65-59c2-41c6-a5b3-7b8f54bafb69?lang=en> (7.06.2023).
- Eurostat. (2023b). *SBS data by NUTS 2 regions and NACE Rev. 2*. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/fa88c84b-43c7-4871-a349-94db72c9657?lang=en> (28.09.2023).
- Fleming S., Hancock A., Espinoza J., *Can the EU keep up with the US on green subsidies?*, 1.02.2023, Financial Times, <https://www.ft.com/content/85b55126-e1e6-4b2c-8bb2-753d3cafcb5>.
- Frank, S. (2023). *Emissions Trading System exemptions betray the steel sector's power and politicians' lack of mettle*. <https://carbonmarketwatch.org/2023/05/05/emissions-trading-system-exemptions-betray-the-steel-sectors-power-and-politicians-lack-of-mettle/> (29.09.2023).

- Friedmann, J., Fan, Z. (2019), *Lowcarbon heat solutions for heavy industry: Sources, options, and costs today*, <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/low-carbon-heat-solutions-heavy-industry-sources-options-and-costs-today/>.
- GUS. *Zużycie paliw i nośników energii w 2021 roku*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-paliw-i-nosnikow-energii-w-2021-roku,6,16.html>.
- GUS. (2023). *Rocznik Statystyczny Przemysłu 2022*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-przemyslu-2022,5,16.html>.
- Hasanbeigi, A., Kirschbaum, L. A., Collison, B. (2023). *Industrial Electrification in U.S. States. An industrial sub-sector and state-level techno-economic analysis*. <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/644b590c1b2a3c41e1ff4e8f/1682659627566/State+level+industrial+Electrification-2.6.2023+C-lean-E.7.pdf>.
- Hetmański, M., Kiewra, D., Iwanowski, D., Czyżak, P. (2021). *Sprawiedliwa transformacja w Wielkopolsce Wschodniej – diagnoza i wytyczne*, Fundacja WWF, <https://instrat.pl/wp-content/uploads/2021/02/WWF-Poland-Sprawiedliwa-transformacja-w-Wielkopolsce-Wschodniej-Raport-2021-02-23.pdf>.
- HIPH. (2023). *Polski Przemysł Stalowy 2022*. [https://www.hiph.org/ANALIZY\\_RAPORTY/pps.php](https://www.hiph.org/ANALIZY_RAPORTY/pps.php).
- Hybrit. (2022). *HYBRIT: Milestone reached – pilot facility for hydrogen storage up and running*. [https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-milestone-reached-pilot-facility-for-hydrogen-storage-up-and-running/\(6.10.2023\)](https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-milestone-reached-pilot-facility-for-hydrogen-storage-up-and-running/(6.10.2023)).
- IEA. (2019a). *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf).
- IEA. (2019b). *Transforming Industry through CCUS*, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/0d0b4984-f391-44f9-854f-fda1ebf8d8df/Transforming\\_Industry\\_through\\_CCUS.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/0d0b4984-f391-44f9-854f-fda1ebf8d8df/Transforming_Industry_through_CCUS.pdf).
- IEA. (2020). *Global end-use steel demand and in-use steel stock by scenario, 2000-2050*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-end-use-steel-demand-and-in-use-steel-stock-by-scenario-2000-2050> (28.09.2023).
- IEA. (2022). *Global hydrogen Review 2022*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>.
- IEA. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>.
- IEA. (2019). *Putting CO<sub>2</sub> to Use*. <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.
- IIGCC. (2021). *Global Sector Strategies: Investor interventions to accelerate net zero steel*. <https://www.climateaction100.org/wp-content/uploads/2021/08/Global-Sector-Strategy-Steel-IIGCC-Aug-21.pdf>.
- Instytut Energetyki. (2023). *Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce*. [https://www.hiph.org/ANALIZY\\_RAPORTY/pps.php](https://www.hiph.org/ANALIZY_RAPORTY/pps.php).
- Kleimann, D. i in. (2023). *Green tech race? The US Inflation Reduction Act and the EU Net Zero Industry Act, "The World Economy"*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/twec.13469>.
- Kobyłka, K. i in. (2023). *Dekarbonizacja przemysłu ciężkiego. Zrównoważone finansowanie jako szansa?* <https://wise-europa.eu/2023/03/13/bariery-dla-dekarbonizacji-przemyslu-ciezkiego-w-polsce/>.
- Komisja Europejska. (2023). *Carbon Border Adjustment Mechanism*. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_pl](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_pl).

- Komisja Europejska. (2023a). *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Plan przemysłowy Zielonego Ładu na miarę epoki neutralności emisyjnej*, COM(2023) 62 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52023DC0062>.
- Komisja Europejska. (2023b). *Competition State aid brief*. [https://competition-policy.ec.europa.eu/system/files/2023-07/state\\_aid\\_brief\\_1\\_2023\\_kdam23001enn\\_TCTF\\_survey\\_0.pdf](https://competition-policy.ec.europa.eu/system/files/2023-07/state_aid_brief_1_2023_kdam23001enn_TCTF_survey_0.pdf)
- Komisja Europejska. (2021). *Converting CO<sub>2</sub> to methanol via steel production to power marine transport*. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/projects/success-stories/all/converting-co2-methanol-steel-production-power-marine-transport> (6.10.2023).
- Komisja Europejska. (2023c). *Just Transition Platform. Accompanying Member States and regions to achieve a just transition*. [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/funding/just-transition-fund/just-transition-platform\\_en](https://ec.europa.eu/regional_policy/funding/just-transition-fund/just-transition-platform_en).
- Komisja Europejska. (2023d). *EU budget: Commission proposes Strategic Technologies for Europe Platform (STEP) to support European leadership on critical technologies*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_3364](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3364).
- Kopeć, J. (2023). *Pas Cementu to wyzwanie inne niż wszystkie*. <https://instrat.pl/pas-cementu/> (28.09.2023).
- Kościótek M. i in. (2023). *Baza danych o emisjach CO<sub>2</sub> przemysłów energochłonnych w latach 2010–2020*. <https://instrat.pl/emisje-przemyslu-baza-danych/>.
- Lelek-Borkowska U., (2022). *Geopolimery*. <https://pre-epodreczniki.open.agh.edu.pl/openagh-download.php?name=Geopolimery&type=pdf>.
- Liberty Steel. (2023). *LIBERTY Steel w Polsce*. <https://libertysteelgroup.com/pl/> (28.09.2023).
- MAP. (2019). *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030*. <https://www.gov.pl/web/klimat/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu>.
- MFiPR. (2023). *Podkomitet ds. transformacji regionów górniczych – Rada ds. Sprawiedliwej Transformacji*. <https://www.funduszeuropejskie.gov.pl/strony/o-funduszach/fundusze-2021-2027/umowa-partnerstwa/komitet-ds-up/podkomitety/sprawiedliwa-transformacja/> (7.07.2023).
- MKiŚ. (2021). *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*. <https://www.gov.pl/attachment/4c261e63-f57d-48e3-b451-10b235aa2de8>.
- MiKŚ. (2023). *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.* (wersja opublikowana w 2023 r.) <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski>.
- MRiT. (2021). *Polityka Przemysłowa Polski*. <https://www.gov.pl/attachment/555c07a8-4d95-49af-9ec-1-282fafdbcac5>.
- MRiT. (2022). *Strategia Produktywności 2030*. <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologie/strategia-produktywnosci-2031>.
- MRiT. (2023). *Kontrakt Branżowy – narzędzie aktywnej sektorowej polityki przemysłowej*. <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologie/kontrakt-branzowy--narzedzie-aktywnej-sektorowej-polityki-przemyslowej> (18.05.2023).
- Myszor, P. (2023). *ArcelorMittal buduje zakład produkcji stali z elektrolizy*. <https://www.wnp.pl/hutnictwo/arcelormittal-buduje-zaklad-produkcji-stali-z-elektrolizy,721083.html> (15.06.2023).
- NACE. *Statistical Classification of Economic Activities NACE Rev. 2*. <https://nace.lursoft.lv/25/manufacture-of-fabricated-metal-products-except-machinery-and-equipment> (7.06.2023).
- Narayanan, P. (2023). *Methanol from CO<sub>2</sub>: a technology and outlook overview*. <https://www.digitalrefining.com/article/1002891/methanol-from-co2-a-technology-and-outlook-overview>.



- Nimbalkarm, S. i in. (2015). *Preliminary Results from Electric Arc Furnace Off-Gas Enthalpy Modeling*. <https://www.osti.gov/biblio/1221728> (6.10.2023).
- Orlen. (2023). *Transformacja energetyczna*. [https://www.orlen.pl/content/dam/internet/orlen/pl/pl/o-firmie/dokumenty/ORLEN\\_FFBK.pdf](https://www.orlen.pl/content/dam/internet/orlen/pl/pl/o-firmie/dokumenty/ORLEN_FFBK.pdf).
- Papapetrou, M. i in. (2018). *Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country*, "Applied Thermal Engineering", vol. 138/2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117347919>.
- Parlament Europejski. (2022). *Climate change: Deal on a more ambitious Emissions Trading System (ETS)*. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/press-room/20221212IPR64527/climate-change-deal-on-a-more-ambitious-emissions-trading-system-ets>. (18.12.2022).
- Perilli, D. (2022). *Update on electric cement kilns*. <https://www.globalcement.com/news/item/14256-update-on-electric-cement-kilns>.
- Piestrzyński, P. (2017). *Dobre prognozy dla branży cementowej*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, wrzesień–październik 2017. [http://www.nbi.com.pl/assets/NBI-pdf/2017/5\\_74\\_2017/Pdf/19\\_SPC.pdf](http://www.nbi.com.pl/assets/NBI-pdf/2017/5_74_2017/Pdf/19_SPC.pdf) (18.01.2023).
- PSE. (2023). *Powstaną specjalne strefy energetyczne. Skorzystają inwestorzy oraz system elektroenergetyczny*. [https://www.pse.pl/biuro-prasowe/aktualnosci/-/asset\\_publisher/fwWgbbtxcZUt/content/powstana-specjalne-strefy-energetyczne-skorzystaja-inwestorzy-oraz-system-elektroenergetyczny?](https://www.pse.pl/biuro-prasowe/aktualnosci/-/asset_publisher/fwWgbbtxcZUt/content/powstana-specjalne-strefy-energetyczne-skorzystaja-inwestorzy-oraz-system-elektroenergetyczny?) (6.09.2023).
- PwC. (2023). *Net Zero Industry Act The green collar opportunity*. <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/energy-utilities-resources/net-zero-industry-act/strategyand-net-zero-industry-act.pdf>.
- Reuters. (2023). *Thyssenkrupp steel workers to hold protests over outstanding government grant*. <https://www.reuters.com/markets/commodities/thyssenkrupp-steel-workers-hold-protests-over-outstanding-government-grant-2023-06-02/> (28.09.2023).
- Ritchie, H., Roser, M. (2020). *Poland: CO<sub>2</sub> Country Profile*. <https://ourworldindata.org/co2/country/poland> (17.01.2023).
- SBTi. (2022). *The Cement Science Based Target Setting Guidance*, <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Cement-Guidance.pdf>.
- SBTi. (2023). *The Steel Science-Based Target-Setting Guidance*, <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Steel-Guidance.pdf>.
- Sgaravatti, G., Tagliapietra S., Trasi C. (2023). *Cleantech manufacturing: where does Europe really stand?* <https://www.bruegel.org/analysis/cleantech-manufacturing-where-does-europe-really-stand-0>.
- Skłodowska, M. (2023). *Przemysł odchodzi od węgla. Wybiera OZE i gaz*. Wysokie Napięcie. <https://wysokienapiecie.pl/87738-przemysl-odchodzi-od-wegla-wybiera-oze-i-gaz/> (7.06.2023).
- Sousa, V., Bogas, J. A. (2021). *Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production*. Journal of Cleaner Production, 306/2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>.
- Swoczyna, B. (2023). *Nierówne narażenie. Dochody z przemysłu węglowego barierą dla dekarbonizacji samorządów*. InStrat Policy Note 03/2023, <https://instrat.pl/nierowne-narazenie/>.
- Swoczyna, B. (2023b). *Marnowanie potencjału. Ograniczanie produkcji energii elektrycznej z OZE w „Polityce energetycznej Polski do 2040 r.”*, InStrat Policy Note 02/2023, <https://instrat.pl/marnowanie-potencjalu/>.
- The Economist. (2023). *There is more than one way to make green steel*. <https://www.economist.com/science-and-technology/2023/05/31/there-is-more-than-one-way-to-make-green-steel> (15.06.2023).
- VoltaChem. (2023). *Electrons to High-Value Chemical Products – E2C*. <https://www.voltachem.com/e2c> (6.10.2023).

White House. (2023). *Building a Clean Energy Economy: A Guidebook to the Inflation Reduction Act's Investments in Clean Energy and Climate Action*. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>.

Wolniak, R. i in. (2020). *Identification of Energy Efficiency Trends in the Context of the Development of Industry 4.0 Using the Polish Steel Sector as an Example*. "Energies" 2020 13(11). [https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2867?type=check\\_update&version=1](https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2867?type=check_update&version=1) (06.06.2023).

World Steel Association. (2023). *World Steel in Figures 2023*. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/#major-steel-producing-countries-%3Cbr%3E-2021-and-2022> (07.06.2023).

World Steel Association. (2021). *Electrolysis in ironmaking*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Electrolysis-in-ironmaking.pdf> (15.06.2023).

Xinhua. (2023). *Chinese energy giant strives for carbon neutrality, launching mega carbon capture project*. <http://global.chinadaily.com.cn/a/202306/05/WS647d3f58a31033ad3f7ba6cd.html> (28.09.2023).

Zachman, G., McWilliams, B. (2021). *A new economic geography of decarbonisation?* <https://www.bruegel.org/blog-post/new-economic-geography-decarbonisation> (25.01.2023).

ZE PAK. (2021). *Produkcja wodoru w ZE PAK SA*. <https://zepak.com.pl/pl/program-czysta-polska/produkcja-wodoru-w-ze-pak-sa.html> (28.09.2023).



# Aneks. Metodologia modelu makroekonomicznego przedstawionego w rozdziale 4

## Podstawowe źródła danych

Głównym źródłem danych modelu input–output są tablice przepływów międzygałęziowych opracowane zgodnie z metodologią SNA/ESA (w bieżących cenach bazowych – z wydzieleniem i bez wydzielenia przepływów pochodzących z importu). Badania te stanowią integralną część działań podejmowanych przez GUS w celu prezentacji systemu rachunków narodowych. Przedstawiają one informacje o wszystkich zasobach polskiej gospodarki pochodzących z produkcji krajowej, importu oraz wykorzystanie tych zasobów na zużycie pośrednie czy wydatków na spożycie i inwestycje. Publikacja GUS zawiera tablicę przepływów międzygałęziowych w cenach bazowych dla produkcji krajowej i tablicę wykorzystania towarów i usług importowanych w 2015 r. w agregatach 77 x 77 działów (sektorów).

## Budowa modelu

Na podstawie wskaźników zużycia pośredniego oraz szacunkowej produkcji całkowitej i popytu finalnego model I–O można algebraicznie opisać równaniem:

$$x = Ax + d$$

gdzie: macierz A jest macierzą współczynników zużycia pośredniego, wektor x to produkcja całkowita według 77 sektorów, natomiast d jest wektorem finalnego popytu. Macierz współczynników A oszacowano na podstawie tablicy przepływów międzygałęziowych dla Polski za 2015 r. Przekształcając powyższe równanie, przyjmując za d zmiany w popycie finalnym zmiany w produkcji całkowitej, można wyliczyć według równania:

$$x = (I-A)^{-1} \cdot d$$

gdzie I jest macierzą jednostkową. Poprzez zmiany w popycie finalnym (np. poprzez inwestycje), a co za tym idzie, zmiany w produkcji całkowitej, można ocenić zmiany w wielkości zatrudnienia.

## Scenariusz referencyjny

Aby ocenić zmiany w produkcji całkowitej przy niezmiennym zużyciu pośrednim pod wpływem zmiany w popycie finalnym (całkowitym lub tylko dotyczącym sektora elektroenergetycznego), należy zbudować scenariusz referencyjny (odniesienia). Taki scenariusz zakłada zmianę wartości dodanej do 2050 r., a także bazową ścieżkę liczby osób zatrudnionych w sektorach gospodarki czy zmiany w produktywności pracy. Scenariusz referencyjny został zbudowany w oparciu o dane historyczne oraz założenia scenariusza REF z modelu PRIMES (Komisji Europejskiej i E3M) o wzroście gospodarczym. W oparciu o metody ekonometryczne oprócz rozwoju VA, jak i jej struktury wykonano projekcje zatrudnienia ogółem i według 77 sektorów. Na podstawie przyjętych trendów należy wyliczyć współczynniki produktywności pracy i zmiany zatrudnienia w sektorach do 2050 r. pod wpływem zmian w wielkości produkcji. Wielkość zatrudnienia w sektorach oraz struktura zatrudnienia zostały wyliczone wg wzorów:

$$\text{Employment in sector} = \text{Value added in sector} / \text{Labour productivity in sector}$$

$$\text{Employment structure} = \text{Employment sector} / \text{Total employment}$$

gdzie:

$$\text{Value added in sector} = \text{Value added structure} \cdot \text{Total value added}$$

Strukturę wartości dodanej, jak i wartość produktywności pracy w Polsce, założono jako zbieżną do wartości dla UE zgodnie z zależnością:

$$\text{Value added structure}_t = (1 - \text{const}_{\text{conv}} (1 - \text{VA structure}_{t-1} / y_{t-1})) y_t$$

$$\text{Labour productivity}_t = (1 - \text{const}_{\text{conv}} (1 - \text{Labour productivity}_{t-1} / x_{t-1})) x_t$$

gdzie  $y$  oraz  $x$  oznaczają strukturę wartości dodanej i wartość produktywności pracy w UE, natomiast  $\text{const}_{\text{conv}}$  stałą konwergencji.

Modelowanie I-O zostało również wykorzystane do oszacowania zmian w zatrudnieniu ogółem na podstawie zmian w produkcji ogółem. Zmiany w zatrudnieniu zostały wyliczone zgodnie z formułą:

$$\text{Total employment change} = \text{Output change} \cdot \text{Employment} / \text{Value added}$$

gdzie zmiany w produkcji ogółem wynikają ze zmian w popycie finalnym. Zmiany w zatrudnieniu zostały zdezagregowane na bezpośrednie i pośrednie. Bezpośrednie zmiany zatrudnienia wynikają z szoku popytowego zaimplementowanego w modelu (tu: dodatkowych inwestycji w gospodarkę zeroemisyjną w stosunku do scenariusza referencyjnego):

$$\text{Direct employment change} = \text{Demand changes} \cdot \text{Employment} / (\text{Value added})$$

Pośrednie zmiany zatrudnienia obliczono jako różnicę między całkowitą a bezpośrednią zmianą zatrudnienia.

