

# Stal nisko- czy zeroemisyjna?

Jak zdekarbonizować produkcję stali w Polsce



Instrat Policy Paper 02/2024

Michał Hetmański

Kamil Laskowski

Michał Kulbacki

Jarosław Kopeć

# Stal nisko- czy zeroemisyjna?

Jak zdekarbonizować produkcję stali w Polsce



**Instytut Inżynierów i Techników Polskich**  
**Instrat Policy Paper 02/2024**

Michał Hetmański

Kamil Laskowski

Michał Kulbacki

Jarosław Kopeć

Warszawa, październik 2024

**Rekomendujemy cytowanie:**

Hetmański, M., Laskowski, K., Kulbacki, M., Kopeć, J. (2024). *Stal nisko- czy zeroemisyjna? Jak zdekarbonizować produkcję stali w Polsce*. Instrat Policy Paper 02/2024.

**Cytowanie kalkulatora kosztów produkcji stali:**

Hetmański, M., Laskowski, K., Kulbacki M., Swoczyna, B. (2024). *Kalkulator kosztów produkcji stali w Polsce*. Fundacja Instrat.

**Autorstwo:**

Michał Hetmański  
Kamil Laskowski  
Michał Kulbacki  
Jarosław Kopeć

**Współpraca:**

Bernard Swoczyna  
Gniewomir Flis  
Patrik Kubiczek

**Kontakt:**

Michał Hetmański  
michal.hetmanski@instrat.pl

**Redakcja:**

Julia Zaleska

**Projekt okładki i skład:**

Anna Olczak

Treść publikacji dostępna 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/stal-nisko-czy-zeroemisyjna](http://www.instrat.pl/stal-nisko-czy-zeroemisyjna)

Arkusze kalkulacyjny zawierający kalkulator kosztów produkcji stali zaprezentowany w rozdziale 3 jest dostępny do pobrania pod adresem:  
[www.link.instrat.pl/stal-nisko-czy-zeroemisyjna-kalkulator](http://www.link.instrat.pl/stal-nisko-czy-zeroemisyjna-kalkulator)

Wszelkie błędy są nasze.  
Stosuje się zwyczajowe zastrzeżenia.

**Instrat Policy Paper 02/2024**

Warszawa, październik 2024

**ISBN:** 978-83-970396-7-4

# Spis treści

<b>Kluczowe liczby i wnioski</b>	4
<b>Wprowadzenie</b>	6
<b>1. Produkcja stali w Polsce</b>	9
1.1. Znaczenie produkcji stali dla polskiej gospodarki	9
1.2. Europejska polityka klimatyczna bodźcem do transformacji polskiego sektora stalowego	12
<b>2. Cztery opcje pozyskiwania nisko- lub zeroemisyjnej stali w Polsce</b>	15
2.1. Opcja 1. Bezpośrednia redukcja żelaza z wykorzystaniem wodoru i elektrycznego pieca łukowego (DRI-EAF + H <sub>2</sub> )	16
2.2. Opcja 2. Układ wielki piec–konwertor tlenowy wraz z wychwytem i składowaniem CO <sub>2</sub> (BF-BOF + CCS)	20
2.3. Opcja 3. Elektryczny piec łukowy (EAF)	23
2.4. Opcja 4. Import zielonej stali	24
<b>3. Produkcja nisko- i zeroemisyjnej stali – kalkulator kosztów produkcji</b>	26
3.1. Założenia i definicja scenariuszy	27
3.2. Wyniki modelowania – konkurencyjność opcji technologicznych	32
3.3. Analiza wrażliwości	40
<b>4. Rekomendacje i wnioski dla decydentów</b>	46
<b>Objaśnienia i skróty</b>	48
<b>Wykaz obiektów</b>	49
<b>Bibliografia</b>	50

# Kluczowe liczby i wnioski



**0,6%**

wyniósł udział produkcji metali podstawowych w wartości dodanej polskiej gospodarki w 2021 r.



**77–98%**

może wynieść spadek emisyjności produkcji stali w opcji nisko- albo prawie zeroemisyjnej w porównaniu do dzisiejszej metody produkcji stali w wielkim piecu i konwertorze tlenowym.



**795–807  
euro/t**

może wynieść koszt produkcji zielonej stali w hucie wykorzystującej technologię bezpośredniej redukcji żelaza (DRI-EAF + H<sub>2</sub>).



**822–863  
euro/t**

może wynieść koszt produkcji stali w ostatniej polskiej hucie zintegrowanej wykorzystującej technologię wielkiego pieca i konwertora tlenowego w Dąbrowie Górniczej, jeśli zainwestuje ona w technologię do wychwytywania CO<sub>2</sub> i osiągnie sprawność tego procesu na poziomie 75%.



**1 074  
euro/t**

może wynieść koszt produkcji stali w tej samej hucie, jeśli nie zainwestuje ona w technologię do wychwytywania CO<sub>2</sub>, a ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> wzrosną do poziomu 300 euro/t w 2040 r. lub później.



**7,2  
TWh**

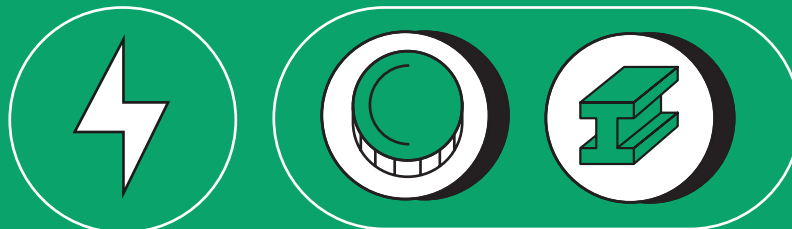
może wynieść roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną przez hutę zielonej stali (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) do produkcji wysokotemperaturowego ciepła w elektrycznym piecu łukowym (ok. 1,4 TWh) oraz na cele produkcji wodoru używanego jako reduktor (ok. 5,8 TWh).



**110  
tys. ton**

wodoru może być potrzebne rocznie do huty zielonej stali (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) – to ok. 10–15% obecnej rocznej produkcji szarego wodoru używanego w przemyśle chemicznym i rafineryjnym (2023 r.) lub potencjału produkcji zdekarbonizowanego wodoru w 2040 r.

- Produkcja stali w technologii bezpośredniej redukcji żelaza z wykorzystaniem elektrycznego pieca łukowego i wodoru jako reduktora (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) może być konkurencyjna kosztowo w porównaniu do innych metod produkcji stali pierwotnej.
- Polska gospodarka potrzebuje strategicznej decyzji, jaki model rozwoju polskiego rynku stali może liczyć na wsparcie ze strony państwa. Pozostawienie sektora samemu sobie może doprowadzić do wygaszenia produkcji stali pierwotnej w Polsce.
- Całkowite zdanie się Polski na import nisko- lub zeroemisyjnej stali nie jest optymalnym rozwiązaniem, ale jego ewentualny wybór musi być świadomy. Towarzyszyć mu powinna też strategia zaspokajania krajowego popytu na stal, a w szczególności na stal pierwotną.
- Decyzji o wyborze modelu dekarbonizacji produkcji stali pierwotnej nie należy odkładać – wprost przeciwnie, należy ją przyspieszyć, nie czekając na wzrost kosztów uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> w systemie EU ETS w latach 30.
- Konieczne jest wsparcie regulacyjne i finansowe, a także inwestycje w infrastrukturę towarzyszącą hutnictwu nisko- lub prawie zeroemisyjnemu, czyli w gospodarkę wodorową oraz w usługi CCS, odpowiednio dla huty DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz BF-BOF + CCS.
- Polska potrzebuje dużej mocy wytwórczych w odnawialnych źródłach energii oraz niskich cen energii elektrycznej ze względu na istotne zapotrzebowanie na prąd przez wszystkie technologie produkcji nisko- i zeroemisyjnej stali.
- Państwo musi aktywnie udzielić wsparcia regionom i grupom społecznym potencjalnie poszkodowanym przez transformację hutnictwa stali. Należy więc rozszerzyć program działań na rzecz sprawiedliwej transformacji, który aktualnie skupia się na regionach górniczych, także o regiony przemysłowe.



# Wprowadzenie

W tym raporcie odpowiadamy na pytania, dlaczego Polska musi i skąd może pozyskiwać nisko- lub zeroemisyjną stal. Stal jest niezbędna w wielu gałęziach gospodarki. Do najistotniejszych należą przemysł zbrojeniowy, motoryzacyjny czy budowlany. Aby utrzymać konkurencyjność tych kluczowych gałęzi krajowego przemysłu, potrzebujemy taniej i czystej energii oraz nisko- lub zeroemisyjnej stali. Jak ją pozyskać? Postanowiliśmy odpowiedzieć na to pytanie w niniejszym raporcie, prezentując wyniki modelowania kosztów produkcji zdekarbonizowanej stali.

**Polski przemysł, w tym sektor stalowy, stoi przed historycznym wyzwaniem dekarbonizacji i utrzymania konkurencyjnej pozycji.** Krajowi producenci stali znajdują się pod rosnącą presją konkurencji ze strony producentów spoza Europy. W 2026 r. rozpocznie się ponadto proces wygaszania darmowego przydziału uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> w systemie EU ETS. Od 2034 r. huty stali będą musiały płacić za wszystkie generowane przez siebie emisje CO<sub>2</sub>. W 2023 r. wszedł w życie unijny mechanizm tzw. cła węglowego (ang. *Carbon Border Adjustment Mechanism*), który prawdopodobnie nie będzie na tyle szczelnym systemem, aby wraz z rosnącym kosztem emisji CO<sub>2</sub> chronić europejskich producentów przed konkurencją spoza UE, która tego kosztu nie ponosi. Ceny energii w Polsce pozostaną natomiast przez długi czas najprawdopodobniej wyższe niż w reszcie Europy.

**Praktycznie w całej Europie rozwijają się nowe inwestycje w huty zielonej stali.** Opierają się one na technologii bezpośredniej redukcji żelaza z wykorzystaniem elektrycznego pieca łukowego i wodoru jako reduktora (DRI-EAF + H<sub>2</sub>). Docelowo mają być one zeroemisyjne dzięki zastosowaniu zielonej energii i zielonego wodoru, przez co staną się bardziej konkurencyjne względem stali produkowanej w tradycyjnej technologii wielkiego pieca wykorzystującego węgiel. Wszystkie te czynniki wpływają negatywnie na pozycję krajowego hutnictwa stali, dla którego nie podjęto do tej pory decyzji dotyczących ścieżki dekarbonizacji.

**Produkcja stali w Polsce spada od prawie dekady, co czyni nas coraz większym jej importerem.** Krajowi producenci nie korzystają na wzroście gospodarczym i rosnącym zapotrzebowaniu na stal, ponieważ, m.in. z uwagi na ceny energii, pozostają niekonkurencyjni względem importowanego towaru. Mimo istotnego zużycia stali w wielu sektorach gospodarki (m.in. budownictwo, infrastruktura, przemysł motoryzacyjny), w Polsce brakuje konsekwentnej polityki przemysłowej.



## Polski rząd i producenci stali stoją przed strategicznym wyborem:

- uratować obecny zakład produkcji stali pierwotnej w Dąbrowie Górniczej (ArcelorMittal) wykorzystujący technologię wielkiego pieca i konwertora tlenowego (BF-BOF) i wyposażyć go w technologię wychwytywania CO<sub>2</sub> (CCS),
- wybudować nową hutę zielonej stali (DRI-EAF + H<sub>2</sub>),
- postawić na produkcję tylko stali z przetopu złomu (EAF) i polegać na imporcie stali pierwotnej.

**Każda znacząca gospodarka przemysłowa w Europie już wybrała metodę głębszej dekarbonizacji produkcji stali.** Kolejne lata odwlekania tej decyzji w Polsce tylko pogłębią lukę handlową, doprowadzając do niekontrolowanej, „dzikiej” transformacji sektora stalowego. W szczególności dotkliwe w skutkach byłoby zamknięcie zakładu ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej. Jeśli uratowanie tego zakładu okaże się niemożliwe, rząd i lokalny samorząd muszą uwzględnić to w procesie zarządzania sprawiedliwą transformacją Górnego Śląska i zmobilizować środki z unijnego Funduszu Sprawiedliwej Transformacji (FST).

W naszym raporcie określiliśmy cztery opcje produkcji i pozyskiwania stali w Polsce oraz podporządkowane im scenariusze:

### OPCJA

1

**Budowa huty zielonej stali** w technologii bezpośredniej redukcji żelaza z wykorzystaniem elektrycznego pieca łukowego i wodoru w roli reduktora (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) – w obecnej lokalizacji huty w Dąbrowie Górniczej lub w nowej lokalizacji mającej dobry dostęp do dużych wolumenów energii z OZE oraz zielonego wodoru (na północy Polski).

### OPCJA

2

**Wyposażenie obecnej huty w Dąbrowie Górniczej w technologię wychwytu CO<sub>2</sub> (CCS)** przy jednoczesnych inwestycjach w infrastrukturę jego transportu (koleją lub rurciągiem) i składowania (w Polsce lub poza nią).

### OPCJA

3

**Dalszy rozwój hutnictwa opartego o technologię łuku elektrycznego (EAF)** wykorzystującego energię elektryczną, poprzez budowę nowej huty EAF zlokalizowanej blisko już istniejących hut tego typu (np. w Dąbrowie Górniczej w miejscu huty BF-BOF) lub w nowej lokalizacji (*greenfield*) blisko dostępu do dużych wolumenów energii z OZE (na północy Polski).

### OPCJA

4

**Import zielonej i konkurencyjnej cenowo stali z zagranicy.**



Każda z tych opcji wymaga wsparcia ze strony rządu poprzez stworzenie nowych regulacji i umożliwienie inwestycji w sektory kluczowe dla dekarbonizacji sektora stalowego. Są to przede wszystkim gospodarka wodorowa (opcja 1) lub infrastruktura CCS (opcja 2).

Nasza analiza wskazuje, że większość takich działań w wiodących europejskich gospodarkach odbywa się z silnym wsparciem państwa, które współfinansuje nowe inwestycje. Dalsze kroki po stronie rządu i potencjalnych inwestorów to:

- określenie, którą lub które z możliwych opcji technologicznych warto wspierać,
- wybranie instrumentów wsparcia – regulacji, dotacji i preferencyjnego finansowania, węglowych kontraktów różnicowych itd.,
- szczegółowa analiza opłacalności z perspektywy inwestora.

Niniejszy raport dostarcza wiedzę, która pozwoli na podjęcie tych kroków w sposób przemyślany.

Analiza składa się z następujących rozdziałów:

- 1 Rozdział 1 stanowi syntetyczne zestawienie kluczowych faktów na temat rynku stali w Polsce – produkcji, bilansu handlowego i emisji CO<sub>2</sub>, a także wyzwań dla produkcji stali w związku z europejską polityką klimatyczną.
- 2 Rozdział 2 przybliży możliwe do zastosowania rozwiązania technologiczne.
- 3 Rozdział 3 prezentuje wyniki autorskiego kalkulatora kosztów produkcji stali według wymienionych opcji technologicznych w formie kalkulatora. Kalkulator ten powstał na bazie uznanego w branży narzędzia think tanku Agora Industry i jest dostępny w ramach otwartej licencji. Stanowi on załącznik do niniejszego opracowania – zachęcamy do pobrania go celem wykonania dalszych własnych analiz, pod adresem wskazanym w stopce redakcyjnej.

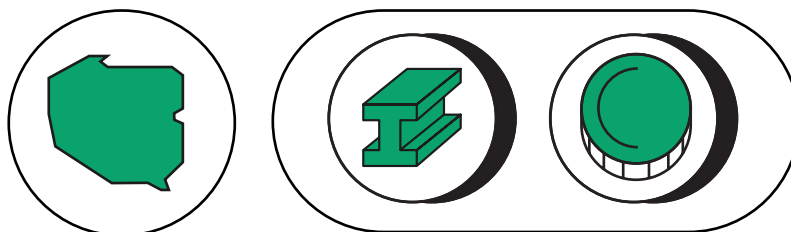
# 1. Produkcja stali w Polsce

## 1.1. Znaczenie produkcji stali dla polskiej gospodarki

Produkcja stali w Polsce spadła w 2022 r. do rekordowo niskiego poziomu, osiągając poziom 6,5 mln ton. W 2023 r. Polska zajęła 23. miejsce w globalnym rankingu największych producentów stali surowej. Wśród krajów europejskich więcej stali produkują Rosja (76 mln ton), Niemcy (35,4 mln ton), Włochy (21,1 mln ton), Hiszpania (11,4 mln ton), Francja (10 mln ton) i Austria (7,1 mln ton) (World Steel Association, 2024).

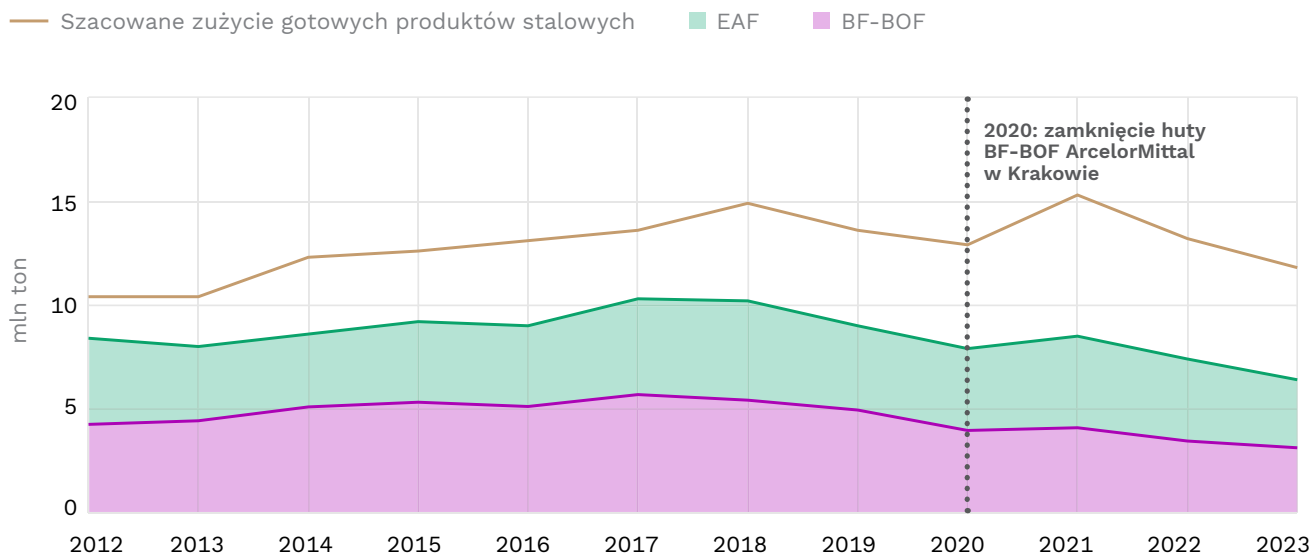
**Rola wytwórstwa metali podstawowych w Polsce jest podobna jak w gospodarkach Niemiec, Włoch czy Hiszpanii.** Cały sektor metali podstawowych<sup>1</sup> odpowiadał w 2021 r. za 0,6% wartości dodanej polskiej gospodarki – to wartość bardzo bliska średniej europejskiej. Wśród największych gospodarek unijnych wyższy udział sektora metali podstawowych w wytwarzaniu wartości dodanej zanotowały Włochy (0,7%), natomiast niższy odsetek Hiszpania (0,5%) oraz Francja (0,3%) (Eurostat, 2024). W Niemczech udział ten jest na poziomie podobnym do Polski.

**Produkcja stali surowej w Polsce spada od ponad 5 lat.** W latach 2012–2021 produkcja utrzymywała się na poziomie 8–10 mln ton stali. W 2022 r. spadła do 7,5 mln ton, a w 2023 r. już do 6,5 mln ton, czyli o 13,5% r/r (wykres 1). Spadek ten był większy niż w Niemczech (-4%), Włoszech (-2,3%) czy Austrii (-5,3%), ale mniejszy niż we Francji (-17,4%) (World Steel Association, 2024). Przyczyną spadku produkcji stali surowej w Polsce było m.in. zamknięcie zintegrowanej huty stali ArcelorMittal w Krakowie w 2020 r. w wyniku recesji spowodowanej pandemią COVID-19, wzrostem cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> od 2020 r., a następnie kryzysem energetycznym z lat 2022–2023 i nagłym wzrostem cen energii.



<sup>1</sup> Należą do niego nie tylko producenci stali, ale również innych metali, w tym aluminium. Dokładne dane na temat samej tylko branży stalowej nie są dostępne.

**WYKRES 1. Produkcja stali surowej w technologii wielkiego pieca i konwertora tlenowego (BF-BOF) oraz łuku elektrycznego (EAF) w Polsce w latach 2012–2023 na tle szacowanego krajowego zużycia gotowych produktów stalowych (mln ton)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie danych World Steel Association (2024).

**Produkcja stali w Polsce nie zaspokaja krajowego popytu.** W roku 2023 Polska zużyła blisko 5,5 mln ton więcej stali niż wyprodukowała, podczas gdy w roku 2012 różnica ta wynosiła jeszcze 2 mln ton. W ciągu dekady luka pomiędzy krajową produkcją a importem powiększyła się więc o 3,5 mln ton, tj. o 170% (wykres 1). Polska stała się więc jednym z największych importerów stali na świecie. W 2023 r. przewaga importu stali nad eksportem wyniosła 6,5 mln ton (World Steel Association, 2024; Bukowski, Bocian, 2024). To najwyższe saldo importu spośród państw unijnych. Większość produkowanej w Polsce stali kierowana jest na eksport, a popyt krajowy zaspokajamy importem, w największym stopniu z Niemiec (Kapczyńska, 2024). Bilans handlowy systematycznie się pogarsza. Od 2015 r. import stali wzrósł ok 20%, a deficyt handlowy pogłębił się o 2,4 mln ton między 2015 a 2023 r. (World Steel Association, 2024).

**Głównymi odbiorcami stali na świecie są branże:**

- budowlana,
- urządzeń mechanicznych,
- motoryzacyjna i transportu,
- produktów metalowych,
- związane z budowaniem odnawialnych źródeł energii, w tym turbin wiatrowych (World Steel Association, 2024).



## RAMKA 1. Kluczowi gracze w branży produkcji stali w Polsce

**W polskiej produkcji stali surowej dominują duże przedsiębiorstwa zagraniczne.** Koncern ArcelorMittal odpowiada za ponad połowę polskiej produkcji. To jednocześnie drugi największy producent surowej stali na świecie – w 2023 roku wyprodukował 68,5 mln ton (World Steel Association, 2024).

Do najważniejszych zakładów ArcelorMittal Poland należą:

- huta wytwarzająca stal pierwotną w oparciu o wielki piec i konwertor tlenowy w Dąbrowie Górniczej,
- instalacje do obróbki stali w Krakowie, Sosnowcu, Chorzowie i Świętochłowicach,
- koksownia w Zdzeszowicach.

ArcelorMittal, poprzez osobną spółkę, zarządza również Hutą Warszawa produkującą stal z wykorzystaniem pieca elektrycznego. Huta w Dąbrowie Górniczej, od chwili wygaszenia pieca w Krakowie w 2020 r., jest jedyną hutą stali w Polsce wytwarzającą stal pierwotną w tradycyjnej technologii wielkiego pieca z wykorzystaniem koksu.

W 2023 r. obie spółki **ArcelorMittal** wyprodukowały w Polsce łącznie blisko 3,6 mln ton stali surowej – to ok. 55% całej krajowej produkcji (ArcelorMittal Poland, 2024; ArcelorMittal Warszawa, 2024; GUS, 2024). Taki wynik zapewnia grupie dominującą pozycję na polskim rynku. Warszawska spółka zatrudnia wraz ze spółkami zależnymi 631 osób (ArcelorMittal Warszawa, 2024). Spółka ArcelorMittal Poland – ponad 9 tys. (ArcelorMittal Poland, 2024).

W 2023 r. ArcelorMittal przeznaczył 720 mln zł na modernizację wielkiego pieca w Dąbrowie Górniczej. Dzięki temu spadnie emisyjność produkcji, a sam piec ma być użytkowany przez kolejne kilkanaście lat. Z dofinansowaniem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju koncern wydał 200 mln zł na poszerzenie oferty produktów stalowych. Łącznie ArcelorMittal Poland w 2023 r. przeznaczył na inwestycje ok. 1,5 mld zł (ArcelorMittal Poland, 2024). ArcelorMittal Warszawa przeznaczył na inwestycje w latach 2022–2023 120 mln zł (ArcelorMittal Warszawa, 2024). Te inicjatywy mają przyczynić się do realizacji zadeklarowanego przez spółkę celu na poziomie europejskim zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> o 30% do 2030 r. i osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r.

Kolejnym ważnym producentem na polskim rynku stali jest **Liberty Steel**, część globalnego konglomeratu przemysłowego GFG Alliance. W 2021 r. przejął on od dotychczasowych właścicieli (Przemysłowy Związek Donbasu, ISD) Hutę Częstochowa opartą obecnie na technologii pieca elektrycznego (EAF). W chwili publikacji niniejszego tekstu (październik 2024 r.) zakład jest jednak w stanie upadłości. Trwają rozmowy z inwestorami dotyczące przejęcia zakładu przez nowego właściciela (Mamoń, 2024).

**Grupa Cognor** jest kolejnym ważnym graczem na krajowym rynku stali – posiada huty elektryczne w Gliwicach i Stalowej Woli. Spółka ma polskich właścicieli i jest notowana na GPW w Warszawie.

Kolejny istotny podmiot to **CMC Poland** będący częścią amerykańskiego koncernu Commercial Metals Company. Najważniejszym zakładem spółki jest huta elektryczna w Zawierciu, w której pracują też walcownie, lakiernia i spawalnia.

W województwie świętokrzyskim mieści się Huta Ostrowiec, która od 2003 r. wchodzi w skład aktywów hiszpańskiego przedsiębiorstwa z branży metalurgicznej **Celsa**. W lipcu 2024 r. huta w Ostrowcu Świętokrzyskim została jednak wystawiona na sprzedaż. W momencie publikacji niniejszego raportu trwały rozmowy z potencjalnymi kupcami, ale transakcja nie została jeszcze przeprowadzona (Myszor, 2024b).

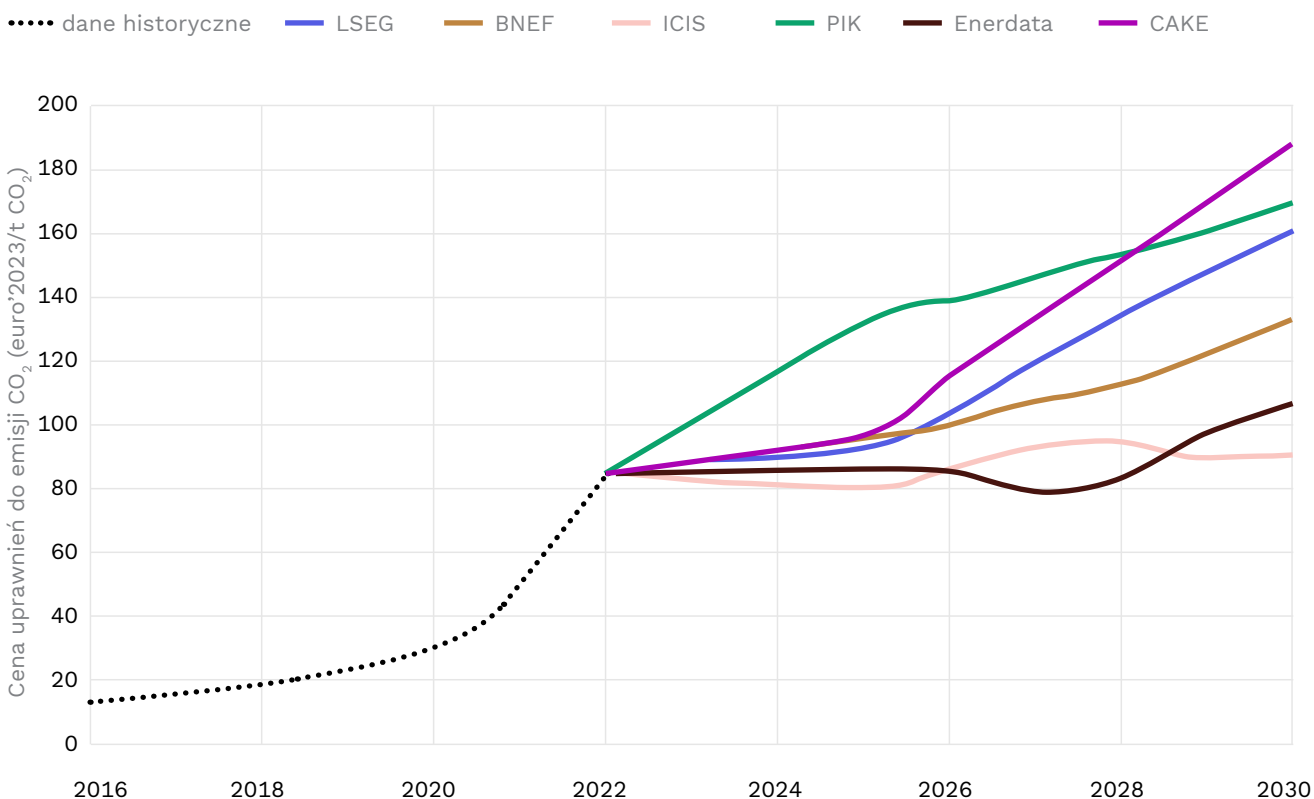
Mniejszym producentem stali surowej w Polsce jest firma **Alchemia S.A.**, właściciel huty stali elektrycznej w Chorzowie. Jest ona częścią Grupy Boryszew, notowanego na warszawskim parkiecie holdingu z polskim kapitałem.

## 1.2. Europejska polityka klimatyczna bodźcem do transformacji polskiego sektora stalowego

Realizacja unijnych celów klimatycznych stanowi kluczowe wyzwanie dla przemysłów energochłonnych, w tym producentów stali. Na skutek reformy systemu handlu emisjami (EU ETS), w latach 2026–2034 do zera spadnie liczba darmowych uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> dla przemysłów energochłonnych, w tym dla stalowego (Parlament Europejski, 2022). Oznacza to, że od roku 2034 zakłady przemysłowe będą musiały płacić za każdą tonę wyemitowanego CO<sub>2</sub>. Szacunki różnych instytucji wskazują na dalszy wzrost cen uprawnień do emisji do poziomu nawet 190 euro za tonę CO<sub>2</sub> w 2030 r. i 440 euro za tonę CO<sub>2</sub> w 2050 r. (KOBiZE, 2023; Pyrka i in., 2023; Ariadne, 2023; wykres 2).

**Równoległe do wycofywania darmowych uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> od 2026 r. w życie będzie wchodziło tzw. cło węglowe** (Parlament Europejski, 2022), czyli CBAM (ang. *Carbon Border Adjustment Mechanism*, Mechanizm dostosowywania cen na granicach [Unii Europejskiej] z uwzględnieniem emisji CO<sub>2</sub>). Celem CBAM jest ochrona europejskich przedsiębiorstw przed konkurencją ze strony nieobciążonych opłatami za emisje pozaunijnych producentów stali i produktów z jej kluczowym udziałem. Opłaty importowe mają odpowiadać kosztom CO<sub>2</sub>, które ponieśliby producenci w UE.

## WYKRES 2. Projekcje cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> do 2030 r. według sześciu największych ośrodków analitycznych w UE (euro'2023/t CO<sub>2</sub>)



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie KOBiZE (2023) i Ariadne (2023).

**Od 2039 r. nie będą już emitowane żadne nowe uprawnienia do emisji CO<sub>2</sub> dla energetyki i przemysłu.** Wynika to z założonego obecnie w dyrektywie EU ETS tempa redukcji całkowitej puli uprawnień do emisji (European Environment Agency, 2023). Prawdopodobnie harmonogram ten będzie jeszcze podlegał zmianom lub zostanie utworzony unijny rynek handlu certyfikatami usuwania CO<sub>2</sub>. Niezbędne do tego technologie pochłaniania CO<sub>2</sub> dopiero wkraczają jednak w fazę masowego rozwoju i mogą nie rozwinąć się do 2039 r. do poziomu pozwalającego wygenerować liczbę certyfikatów, która zaspokoi zapotrzebowanie emitentów CO<sub>2</sub>. Niemniej jednak działania Unii Europejskiej wskazują, że jest ona zdeterminowana do zdekarbonizowania produkcji przemysłowej i presja regulacyjna na obniżenie emisji CO<sub>2</sub> będzie z jej strony rosła.

**W najbliższej dekadzie konkurencyjność produkcji stali nisko- lub prawie zeroemisyjnej będzie rosła** (w przeciwieństwie do tzw. brudnej stali). Nie będzie ona bowiem obciążona kosztem drożących uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>. Wzrost cen będzie najszybszy i najwyższy w przypadku stali produkowanej w szczególnie emisyjnej technologii wielkiego pieca i konwertora tlenowego (BF-BOF), a więc w odniesieniu do ok. połowy produkowanej w Polsce stali. W mniejszym stopniu podwyżki dotkną znacznie mniej emisyjną technologię łuku elektrycznego (EAF).



## RAMKA 2. Huty zielonej stali w Niemczech

Sektor stalowy odpowiada za ok. 30% emisji z niemieckiego przemysłu (Schreck i in., 2023). Dlatego dekarbonizacja tego przemysłu w Niemczech jest jednym z kluczowych wyzwań, niemiecki rząd wprowadził szereg polityk, regulacji oraz instrumentów finansowych mających wspierać transformację tego sektora ku bardziej zrównoważonej produkcji.

Wśród takich działań rządu można wymienić strategię rozwoju gospodarki wodorowej (niem. *Nationale Wasserstoffstrategie*, por. BMBF, 2023), jak i bezpośrednie zaangażowanie w inwestycje w konkretne zakłady produkujące stal. Rząd federalny wraz z rządem kraju związkowego Nadrenia Północna-Westfalia przeznaczyły łącznie ok. 2 mld euro na inwestycję w dekarbonizację huty Thyssenkrupp w Duisburgu, która zmieni proces technologiczny z wielkiego pieca i konwertora tlenowego na technologię bezpośredniej redukcji żelaza. Udział właściciela huty w realizacji projektu wyniósł mniej niż 1 mld euro (Thyssenkrupp, 2023; Reuters, 2023). W październiku 2024 r. Thyssenkrupp ogłosił jednak, że przystąpił do rewizji swoich planów dotyczących produkcji stali z wykorzystaniem zielonego wodoru. Władze Nadrenii Północnej-Westfalii zapowiedziały już konieczność zwrotu miliardowej dotacji w przypadku odstąpienia od inwestycji. Koncern jednak nie potwierdza, że planuje zarzucić projekt, choć oblicza ewentualne koszty takiej decyzji (wnp.pl, 2024; Euronews, 2024).

Również ze wsparciem rządu federalnego i kraju związkowego realizowany jest projekt SALCOS, który ma doprowadzić do zmiany technologicznej w hutach Salzgitter AG. Produkcja emisyjna zostanie tam zastąpiona niskoemisyjną produkcją stali w procesie redukcji bezpośredniej i pieców elektrycznych (DRI-EAF + H<sub>2</sub>), co ma doprowadzić do redukcji emisji o 95%. Łącznie pomoc federalna i krajowa wyniosą ok. 1 mld euro (Salzgitter AG, 2023). Korzystając ze wsparcia z programu Horyzont 2020, firma prowadzi także badania wdrożeniowe związane ze zwiększeniem sprawności wytwarzania wodoru z wykorzystaniem wysokich temperatur (Salzgitter AG, 2024).

**Niemcy są także pionierem w stosowaniu węglowych kontraktów różnicowych** (ang. *carbon contracts for difference*) jako formy wsparcia ze środków publicznych dla zielonych inwestycji w przemyśle. W marcu 2024 r. ruszył pierwszy nabór wniosków w ramach programu (BMWK, 2024), którego istotą jest subsydiowanie zielonej produkcji przemysłowej, dopóki wraz z rosnącym kosztem emisji, nie stanie się ona tańsza w odniesieniu do ustalonej w kontrakcie referencyjnej ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>. Wówczas to przedsiębiorstwo zaczyna zwracać państwu różnicę pomiędzy ceną ustaloną w kontrakcie a rzeczywistą ceną uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>. Instrument ten jest skierowany do wszystkich przedsiębiorstw przemysłowych w Niemczech, w tym stalowych.

## 2. Cztery opcje pozyskiwania nisko- lub zeroemisyjnej stali w Polsce

Dekarbonizacja produkcji i użycia w Polsce stali może odbyć się na drodze czterech opcji:

1

**Budowa nowego zakładu produkcji stali surowej** w obecnej lokalizacji (Dąbrowa Górnictwa) lub w nowej (na północy Polski) w oparciu o technologię bezpośredniej redukcji żelaza (DRI) z wykorzystaniem wodoru ( $H_2$ ) jako reduktora i elektrycznego pieca łukowego (EAF), które razem tworzą hutę zintegrowaną.

DRI-EAF +  $H_2$

2

**Modernizacja obecnej huty zintegrowanej** (Dąbrowa Górnictwa) opartej o technologię zasilanego koksem wielkiego pieca i konwertora tlenowego (BF-BOF) poprzez budowę instalacji wychwytywania  $CO_2$  oraz infrastruktury do dalszego jego transportu w kierunku miejsc składowania (CCS).

BF-BOF + CCS

3

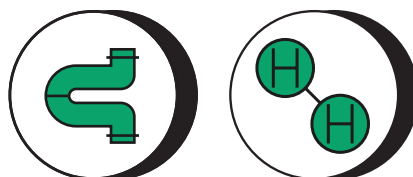
**Produkcja stali ze złomu** w istniejących lub nowych lokalizacjach w oparciu o technologię elektrycznych pieców łukowych (EAF).

EAF

4

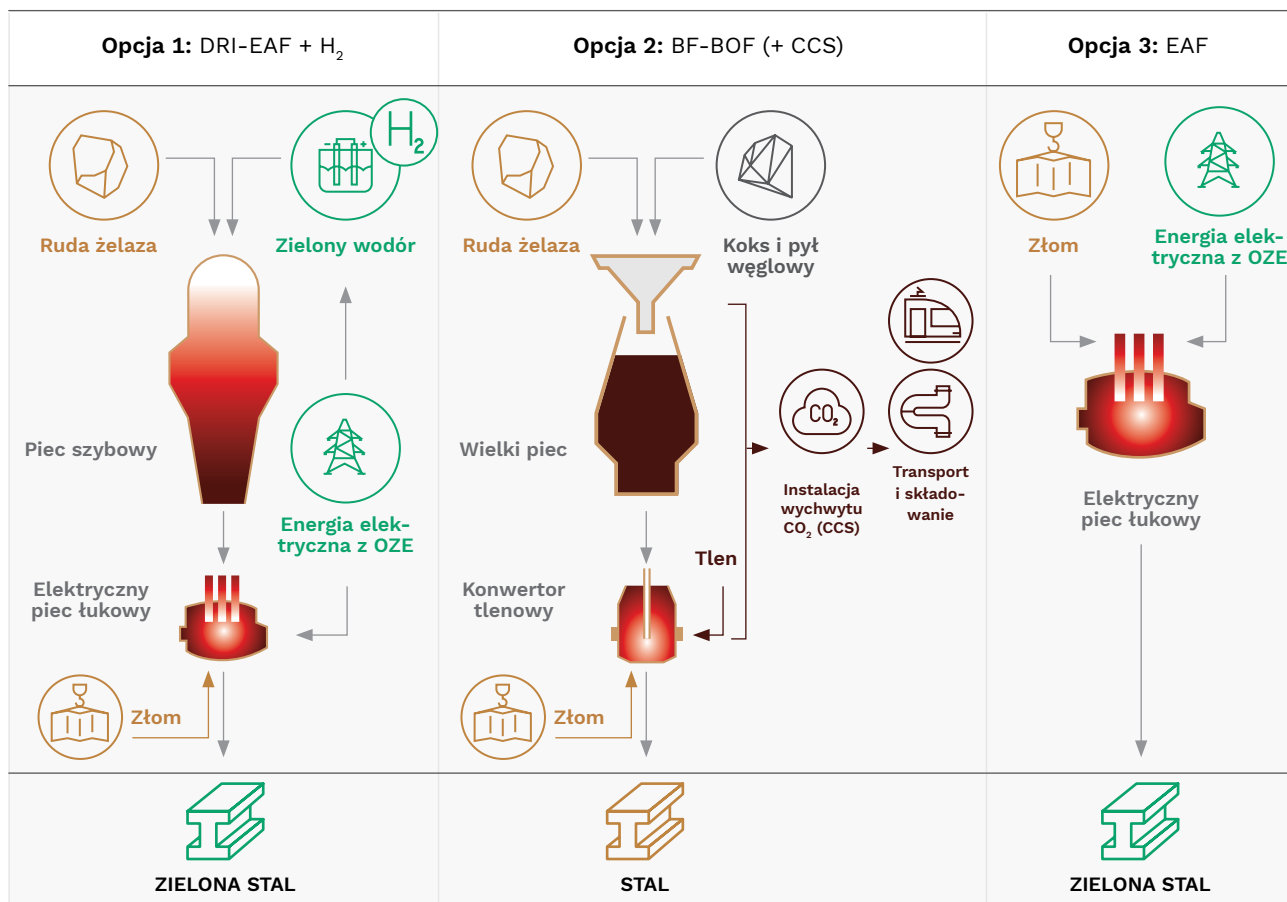
**Import zielonej stali** z krajów o rozwiniętej bazie produkcyjnej – transportowanej drogą lądową z pobliskich rynków lub morską z krajów np. południa Europy i północnej Afryki.

Import





**SCHEMAT 1. Uproszczony proces technologiczny produkcji nisko- lub zeroemisyjnej stali w hucie opartej o bezpośrednią redukcję żelaza (DRI-EAF + H<sub>2</sub>), w wielkim piecu i konwertorze tlenowym z wychwytem CO<sub>2</sub> (BF-BOF + CCS) oraz w elektrycznym piecu łukowym (EAF)**



Źródło: opracowanie własne Instraat na podstawie IRENA (2022). Dokonano istotnych adaptacji względem pierwotnej wersji schematu.

## 2.1. Opcja 1. Bezpośrednia redukcja żelaza z wykorzystaniem wodoru i elektrycznego pieca łukowego (DRI-EAF + H<sub>2</sub>)

W procesie bezpośredniej redukcji żelaza i dalszego wytopu w elektrycznym piecu łukowym stal wytwarza się z rudy żelaza z wykorzystaniem wodoru lub ewentualnie gazu ziemnego jako reduktora (DRI – ang. *direct reduction of iron*; EAF – ang. *electric arc furnace*). Energia cieplna pochodzi z spalania wodoru (albo gazu ziemnego), który służy również jako reduktor (analogicznie do roli koksu w wielkim piecu).

Wytworzony z odnawialnych źródeł energii wodór (tzw. zielony wodór) zastosowany w tej technologii pozwala zmniejszyć emisyjność produkcji stali o 95% w stosunku do dzisiejszej domyślnej opcji – wielkiego pieca i konwertora tlenowego (Keßler, Lovisolo, 2023). W tak prowadzonym procesie produktem ubocznym jest, w miejsce CO<sub>2</sub>, para wodna. Surówka żelaza wytworzona w procesie redukcji bezpośredniej z przetopionej rudy żelaza musi być następnie przetopiona w elektrycznym piecu łukowym (EAF) – stąd skrót DRI-EAF.

**Kluczowym ograniczeniem na drodze do uruchomienia technologii DR-EAF + H<sub>2</sub> jest dostęp do zielonego wodoru.** Dostęp do lokalnie produkowanego wodoru jest natomiast uzależniony od dostępności dużych wolumenów zielonej energii elektrycznej. Co więcej, ograniczeniem jest obecna niska gotowość producentów elektrolizerów do dostarczenia wysoce niezawodnych urządzeń (elektrolizerów i aparatury towarzyszącej). Branża ta znajduje się nadal we wczesnym stadium rozwoju. Kolejnym ograniczeniem są tworzone dopiero przepisy regulujące gospodarkę wodorową. W Polsce rozwijane są projekty, które mają na celu zwiększenie skali produkcji wodoru i obniżenie jej kosztów<sup>2</sup>.

**Obecnie tańszym od zielonego wodoru reduktorem do wykorzystania w procesie DRI jest gaz ziemny** (Kopeć i in., 2023). Dysproporcja w cenach reduktorów może jednak ulec zmianie<sup>3</sup>. Spowodować mogą ją, z jednej strony, wzrost kosztów emisji związanych z wykorzystaniem gazu, z drugiej – wzrost efektywności wytwarzania zielonego wodoru o dużym wolumenie i produkcji samych elektrolizerów. Międzynarodowa Agencja Energii (IEA) przewiduje, że do 2030 r. cena elektrolizera może spaść o 60% w stosunku do 2023 r. (IEA, 2023).

W dalszej części raportu odnosimy się jedynie do wariantu zastosowania zielonego wodoru w przypadku rozważanej huty zielonej stali (DRI-EAF + H<sub>2</sub>). Nie rozważamy scenariusza, w którym w hucie DRI stosowano by gaz ziemny w roli reduktora. Takie rozwiązanie byłoby naszym zdaniem przejściowe i najprawdopodobniej ekonomicznie oraz geopolitycznie nieuzasadnione (wysokie nakłady na infrastrukturę doprowadzenia gazu i rosnące koszty emisji CO<sub>2</sub>, brak odpowiednich krajowych zasobów gazu ziemnego).

**Koszt produkcji zielonej stali w procesie DRI może spadać wraz ze spadkiem cen energii elektrycznej i wodoru.** Poprawiałoby to konkurencyjność tej produkcji. Jednocześnie przewaga kosztowa tej technologii względem innych, zwłaszcza BF-BOF, będzie rosła wraz ze wzrostem cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>.

Huta zielonej stali (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) jest znacznie bardziej wrażliwa na ceny pozyskiwanej z zewnątrz energii elektrycznej niż tradycyjna huta (BF-BOF) pozyskująca energię elektryczną w wyniku odzysku energii z procesów wytwarzania ciepła. Z kolei wzrost cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> w systemie EU ETS wpłynie na wzrost kosztów produkcji huty BF-BOF.

---

2 Przykładem jest realizowany przy wsparciu publicznym projekt LOTOS Green H<sub>2</sub>, który zakłada budowę elektrolizera o mocy 100 MW przy rafinerii w Gdańsku (MKiŚ, 2023b). Orlen zapowiadał też budowę elektrolizerów korzystających z nadmiarów energii elektrycznej z farm wiatrowych na Morzu Bałtyckim (Orlen, 2022). Z kolei na Śląsku rozwijany jest projekt Polenergii, gdzie w ramach unijnego projektu IPCEI Hy2Infra zakładana jest budowa fabryki zielonego wodoru (H2Silesia) o mocy ok. 105 MW, zaś wolumen produkcji ma sięgnąć 13 tys. ton wodoru rocznie (Polenergia, 2024).

3 Zdecydowana większość istniejących hut DRI funkcjonuje w krajach arabskich właśnie ze względu na niski koszt lokalnie pozyskiwanego gazu ziemnego. W kontekście europejskim należy zaznaczyć, że większość rozpoczynanych projektów DRI opiera się w fazie początkowej na gazie ziemnym zamiast bezpośrednio na zielonym wodorze w roli reduktora ze względu nie na cenę, ale aktualną dostępność obu surowców.

Może to zwiększyć różnicę między kosztami produkcji i tym samym potencjalną marżą producenta zielonej stali, czyli różnicę między ceną sprzedaży stali a kosztami jej produkcji w hucie DRI. Szczegółową analizę wrażliwości zaprezentowano w kolejnym rozdziale.

**Zestawienie kosztów produkcji zielonej stali nie wystarcza inwestorom do podjęcia decyzji o inwestycji w budowę nowej huty.** Ocena konkurencyjności kosztowej jednej technologii w porównaniu do drugiej nie pozwala bowiem sformułować jednoznacznej oceny, która z nich wygra w wyścigu technologicznym. Analiza opłacalności inwestycji opiera się na także na innych szczegółowych wskaźnikach finansowych<sup>4</sup>, które w długim horyzoncie czasowym inwestycji na miarę huty stali są bardziej złożone i zmienne niż w przypadku mniejszych, prostszych inwestycji.

Dlatego kraje stawiające na rozwój technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> oferują hojne finansowanie zwrotne i bezzwrotne: dotacje na pokrycie nakładów kapitałowych (CAPEX) lub finansowanie dłużne (kredyt, gwarancje) o oprocentowaniu niższym niż rynkowe (ramka 2). Ten drugi element jest w szczególności istotny dla Polski i krajów spoza strefy euro, gdzie obecnie wyższe i stale wysokie stopy procentowe zmniejszają gotowość inwestorów do podjęcia się inwestycji.

**Komisja Europejska oferuje fundusze i dotacje na projekty dekarbonizacyjne w przemyśle i gospodarce wodorowej.** Fundusz Innowacyjny wspiera projekty mające na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych w sektorze przemysłowym, w tym w produkcji stali (Komisja Europejska, 2024). Wsparcie z tego instrumentu otrzymał m.in. projekt HYBRIT, w ramach którego technologia DRI zostanie wdrożona w Szwecji, a także kilka projektów w Polsce, choć nie w sektorze stalowym (Komisja Europejska, 2022).

Obecnie trwa dyskusja nad tym, jak wzmocnić w kolejnej perspektywie finansowej UE (po 2027 r.) finansowanie dekarbonizacji z unijnej puli środków, tak aby uzupełnić to oferowane przez rządy zachodnich gospodarek (Korolec, 2024; Kopeć i in., 2023; Financial Times, 2023).

**W Europie powstaje przynajmniej 13 hut stali w technologii DRI z wykorzystaniem zielonego wodoru.** Inwestycje te realizowane są głównie poza regionem Europy Środkowo-Wschodniej (tabela 1). Niektóre z nich mają skupiać się tylko na bezpośredniej redukcji i przekazywać zredukowane żelazo do innych zakładów i dalszej obróbki. Inne planują wytwarzać stal na miejscu w piecach elektrycznych (EAF). Realizowane są też projekty obejmujące budowę elektrolizerów (ELS), w tym jeden budowę mocy OZE (RES).

Tabela 1 przedstawia przegląd projektów inwestycji w zielonym hutnictwie z całej Europy – realizowane są one zarówno przez doświadczonych w branży firmy metalurgiczne, jak i nowych inwestorów, w praktycznie wszystkich częściach Europy. Wyjątek na tej liście stanowi Europa Środkowo-Wschodnia, gdzie jedynie w Rumunii realizowany jest projekt LibertySteel.

---

<sup>4</sup> Odpowiednio wysoka stopa zwrotu – IRR (ang. *internal rate of return*), czyli dodatnie NPV (ang. *net present value*, wartość bieżąca netto).

**TABELA 1. Projekty budowy hut DRI realizowane w Europie**

Firma	Lokalizacja	Technologie	Planowane uruchomienie	Zdolność produkcyjna (mln t rocznie)
ArcelorMittal	Gent, Belgia	DRI + EAF	2030	2,5
Blastr Green Steel	Inkoo, Finlandia	DRI + EAF + ELS	2026	2,5
ArcelorMittal	Gent, Belgia	DRI + EAF	2030	2,5
Gravithy	Fos-sur-Mer, Francja	DRI	2027	2
ArcelorMittal	Gijón, Hiszpania	DRI + EAF	2025	1,1
H2 Green Steel	Hiszpania	DRI + ELS	2025	2
Hydnum Steel	Puertollano, Hiszpania	DRI + EAF + ELS + RES	2026	0,6
ArcelorMittal	Hamburg, Niemcy	DRI + EAF	2026	1,75
Dillinger Saarstahl	Dillingen, Völklingen, Niemcy	DRI + EAF	2027	3,5
Salzgitter	Salzgitter, Niemcy	DRI + EAF	2033	1,9
Thyssenkrupp	Duisburg, Niemcy	DRI	2026	2,5
Metalloinvest	Żeleznogorsk, Rosja	DRI	2024	2,1
Liberty Steel	Gałac, Rumunia	DRI + EAF	2024	2,5
H2 Green Steel	Boden, Szwecja	DRI + EAF + ELS	2024	5

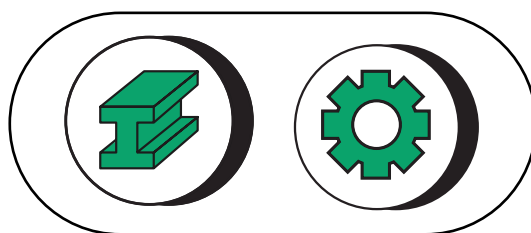
Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie danych DIW Berlin (Hüttelm, Lehner, 2024).

DRI – bezpośrednia redukcja żelaza (ang. *Direct Reduced Iron*).

EAF – łukowy piec elektryczny (ang. *Electric Arc Furnace*).

ELS – elektrolizer.

RES – odnawialne źródła energii (ang. *Renewable Energy Sources*).



## 2.2. Opcja 2. Układ wielki piec–konwerty tlenowy wraz z wychwytem i składowaniem CO<sub>2</sub> (BF-BOF + CCS)

Technologia wielkiego pieca i konwertora tlenowego (ang. *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace*, BF-BOF) jest obecnie wiodącą na świecie metodą produkcji stali. W ten sposób wytwarza się obecnie rocznie ok. 70% światowej stali surowej (Bukowski, Bocian, 2024).

W wielkim piecu ruda żelaza, przy temperaturze powyżej 900°C, ulega tzw. redukcji, czyli oczyszczeniu. Redukcja jest możliwa dzięki dostarczeniu do wielkiego pieca koksu, a cały proces jest stymulowany poprzez wdmuchiwanie gorącego powietrza i pyłu węglowego. Koks ulega spalaniu w wielkim piecu, a produkty jego spalania reagują z tlenkami żelaza obecnymi w rudzie, przyłączając do siebie tlen. Produktami tej reakcji są dwutlenek węgla i żelazo w formie tzw. surówki. Surówka podlega dalszemu oczyszczaniu w konwerterze tlenowym, gdzie poprzez nadmuchy czystego tlenu utleniane są (i usuwane w ten sposób) pozostałe nieczystości<sup>5</sup>.

**Technologia CCUS zakłada wychwyt CO<sub>2</sub> z zakładów opierających się na paliwach kopalnych.** Następnie wychwycony CO może być transportowany do:

- 1 miejsca składowania (CCS – *Carbon Capture and Storage*),
- 2 dalszego wykorzystania w innych procesach przemysłowych (CCU – *Carbon Capture and Utilisation*).

Ta metoda może pozwolić na modernizację istniejących zakładów stalowych bez konieczności ich całkowitej przebudowy oraz potencjalnie uratować je przed zamknięciem (World Steel Association, 2024b; Laskowski, 2023). Kluczowymi parametrami definiującymi zastosowanie technologii CCUS są:

- koszty inwestycji,
- poziom koncentracji CO<sub>2</sub> w strumieniu gazów,
- sprawność wychwytu (udział wychwyconego CO<sub>2</sub> w całości wytworzonego CO<sub>2</sub>),
- energochłonność procesu,
- techniczne przygotowanie zakładu do zamontowania efektywnej dedykowanej instalacji (*CCS readiness*),
- możliwość użycia CO<sub>2</sub> na cele produkcji innych materiałów,
- sposób i koszty transportu (koleją lub rurociągiem),
- sposób i koszty składowania (w kraju lub za granicą).

---

<sup>5</sup> W rozdziale 3 prezentujemy modelowane szczegółowe informacje o emisyjności tej technologii.

**Technologia CCUS nie została zaimplementowana na szeroką skalę w żadnej dużej hucie stali BF-BOF** (Nicholas, Basirat, 2024). Jest natomiast na coraz wyższym stadium rozwoju w sektorze cementowym. Inaczej niż w przypadku technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> nie są też realizowane żadne duże projekty, które miałyby to zmienić. Wyjątkiem jest huta ArcelorMittal w Gandawie, gdzie w 2024 r. uruchomiono, we współpracy z Mitsubishi Heavy Industries i firmą D-CRBN, pierwszą pilotażową instalację wychwytu CO<sub>2</sub> i konwersji go w CO (tlenek węgla). Następnie uzyskany CO<sub>2</sub> wykorzystywany jest jako reduktor w procesie tworzenia stali lub w przemyśle chemicznym. Projekt ten ma jednak ograniczony zakres, gdyż wychwytuje CO<sub>2</sub> tylko z jednego punktu emisji na terenie huty (z wielkiego pieca). Sprawność tego procesu nie jest znana publicznie (ArcelorMittal, 2024b).

**Istniejące huty zintegrowane BF-BOF mają ograniczenia technologiczne przeszkadzające w osiągnięciu wysokiej sprawności wychwytu CO<sub>2</sub>.** Istotnym wyzwaniem w osiągnięciu wysokiego poziomu odzysku CO<sub>2</sub>, a tym samym zmniejszenia kosztu zakupu uprawnień do jego emisji, jest z natury nieuszczelna i wieloetapowa produkcja stali w ramach procesu technologicznego. Dlatego w literaturze i badaniach nad możliwościami zastosowania CCS we wszystkich przemysłach i procesach energetycznych uważa się sektor stalowy za jeden z trudniejszych do zdekarbonizowania tą ścieżką.

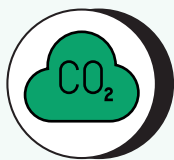
Zakładana w literaturze sprawność wychwytu CO<sub>2</sub> takiej instalacji w samym piecu i konwertorze to ok. 60%. Pozostałe 40% nadal byłoby emitowane do atmosfery (Clean Air Task Force, 2022). Niemniej jednak CCS zastosowany może być z powodzeniem we wszystkich pozostałych częściach łańcucha wartości stali węglowej, w szczególności w elektrowniach i elektrociepłowniach dostarczających na rzecz huty media energetyczne.

W przypadku zakładu w Dąbrowie Górniczej CCS musiałby również być zlokalizowany w Zakładzie Wytwarzania NOWA (należącym do spółki TAMEH), gdzie sprawność ta może osiągnąć 80–90% ze względu na bardziej szczelny i kontrolowalny proces technologiczny (*ibidem*). Zbadana przez nas średnia ważona sprawność wychwytu z całego łącznego strumienia emisji CO<sub>2</sub> wynosi w tym konkretnym zakładzie ok. 75%.

**Technologia CCS wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i operacyjnymi oraz niepewnością regulacyjną.** Szacowany przez Clean Air Task Force (CATF, 2022) koszt wychwytu, transportu i sekwestracji CO<sub>2</sub> dla huty w Dąbrowie Górniczej waha się w zakresie 79–160 euro za tonę CO<sub>2</sub> (szczegółowe obliczenia i analiza wrażliwości w rozdziale 3).

**Technologia CCUS jest wspierana przez unijny Fundusz Innowacyjny, ale do tej pory dotacją nie objęto projektów z sektora stalowego.** W ostatnim zamkniętym naborze projektów wielkoskalowych zakończonym w 2023 r. wsparcie otrzymały projekty CCUS w sektorze cementowo-wapienniczym w Belgii, Niemczech, Chorwacji i Grecji (Komisja Europejska, 2024). We wcześniejszym naborze otrzymał je także projekt realizowany w Cementowni Kujawy. W obu naborach nie przyznano wsparcia projektom z sektora metalurgicznego.

W Polsce jedynym kandydatem do wielkoskalowej implementacji CCUS w sektorze stalowym jest ostatnia huta wykorzystująca technologię wielkiego pieca i konwertora tlenowego, czyli należący do koncernu ArcelorMittal zakład w Dąbrowie Górniczej.



### **RAMKA 3. Technologia wychwytu CO<sub>2</sub> w Cementowni Kujawy – projekt Kujawy Go4ECOPlanet**

Wytwarzanie cementu, podobnie jak stali, wiąże się z istotnymi emisjami CO<sub>2</sub>. W odróżnieniu od sektora stalowego, w branży cementowej praktycznie brakuje jednak alternatyw technologicznych, które pozwoliłyby wyprodukować bezemisyjny cement o identycznych parametrach (Kopeć i in., 2023). Dlatego Cementownia Kujawy, należąca do Grupy Holcim, prowadzi projekt implementacji instalacji CCS. Wychwyt CO<sub>2</sub> rozpocznie się tam już w 2027 r., a instalacja będzie wychwytywać 100% emisji z podstawowego procesu produkcyjnego, jakim jest produkcja klinkieru. To ponad 1 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie (Holcim, 2024).

Technologia CCS w Cementowni Kujawy obejmuje wychwytywanie CO<sub>2</sub> z procesu produkcji cementu, a następnie sprężanie i transportowanie gazu do miejsc składowania na Morzu Północnym, a w przyszłości potencjalnie w krajowych składowiskach na lądzie. Twórcą i wykonawcą kriogenicznej technologii odzyskiwania CO<sub>2</sub> ze strumienia emisji Cryocap™ FG jest Air Liquide.

Projekt CCS w Cementowni Kujawy wymagał znacznych nakładów inwestycyjnych. Całkowity koszt projektu szacowany jest na ok. 380 mln euro. Inwestycja jest współfinansowana kwotą aż 228 mln euro przez unijny Fundusz Innowacyjny i zasilany środkami pochodzącymi z systemu EU ETS.

Długoterminowo koszty operacyjne związane z technologią CCS mogą być znaczące ze względu na energochłonność tego procesu. Przewiduje się jednak, że będą one kompensowane przez oszczędności wynikające z uniknięcia opłat za emisję CO<sub>2</sub>. W Europie wynoszą one obecnie ok. 70 euro za tonę CO<sub>2</sub>, ale będą konsekwentnie rosnąć w wyniku ewolucji systemu EU ETS i spadku alokacji darmowych uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> dla przemysłu energochłonnego.

## 2.3. Opcja 3. Elektryczny piec łukowy (EAF)

W elektrycznym piecu łukowym (EAF) stal produkuje się, topiąc złom stalowy za pomocą łuku elektrycznego w temperaturze ok. 1800°C. Oprócz złomu surowcem może być żelazo uzyskane w procesie bezpośredniej redukcji żelaza (DRI, por. podrozdział 2.1.), a także w formie zimnej (HBI – ang. *hot-briquetted iron*) – przetransportowane z huty pracującej w oparciu o proces DRI. W naszym scenariuszu zakładamy jednak wykorzystanie pieców EAF wyłącznie do przetapiania złomu.

### **Proces EAF wiąże się z nawet 20 razy niższymi emisjami niż proces BF-BOF.**

Na tonę stali wyprodukowanej w procesie BF-BOF emisje bezpośrednie sięgają w Polsce 1,9 tony CO<sub>2</sub> na tonę wyprodukowanej stali. Jeśli doliczyć do tego emisje koksowni, emisyjność tony stali surowej rośnie do poziomu 2,1 tony CO<sub>2</sub> na tonę stali. Tymczasem proces EAF, przy zapewnieniu mu w 100% bezemisyjnej energii elektrycznej, wiąże się z emisjami na poziomie zaledwie ok. 0,06 tony CO<sub>2</sub> na tonę stali<sup>6</sup> (wykres 6). W procesie tym używa się jednak niewielkich ilości węgla i gazu ziemnego, dlatego zaleca się ostrożność w określaniu tej technologii jako w pełni zielonej.

**Dla rentownej produkcji stali w technologii EAF w Polsce kluczowy jest dostęp do taniej i bezemisyjnej energii elektrycznej.** Rozwój hut elektrycznych będzie wspierany przez inwestycje w dekarbonizację polskiej energetyki, w szczególności możliwości zakupu energii w formule kontraktów PPA (ang. *power purchase agreements*) lub dzięki linii bezpośredniej.

### **Koszty budowy i eksploatacji zakładu EAF są niższe niż wielkich pieców.**

Budowa huty EAF o rocznej zdolności produkcyjnej 1 mln ton stali w formule *brownfield* to ok. 500–900 mln euro<sup>7</sup> (Hüttelm, Lehner, 2024). Koszty operacyjne uzależnione są w głównej mierze od cen energii elektrycznej oraz złomu.

**Polskie huty, poza Dąbrową Górniczą, działają obecnie w oparciu o technologię łuku elektrycznego.** To zakłady w Częstochowie, Warszawie, Zawierciu, Gliwicach, Ostrowcu Świętokrzyskim, Stalowej Woli i Chorzowie (ramka 1). Obecność w Polsce know how z tego sektora i fakt, że EAF to dojrzała technologia, mogą znacząco obniżyć koszty budowy nowych zakładów. ArcelorMittal, który operuje równocześnie jedyną hutą BF-BOF w Polsce, ale też zakładem EAF w Warszawie, planuje znaczące inwestycje w europejskie zakłady EAF w ramach strategii dekarbonizacji (ArcelorMittal, 2021).

<sup>6</sup> W przypadku procesu BF-BOF spalanie węgla odgrywa rolę zarówno procesową (redukcja żelaza), jak i energetyczną (ciepło). Z tego powodu można uznać, że traktowanie spalania węgla w tym procesie w całości jako emisji bezpośredniej, zniekształca obliczenia na temat emisyjności bezpośredniej w porównaniu do technologii EAF, której emisje energetyczne odbywają się poza zakładem – w zakresie 2. Za wliczaniem węgla przemawia jednak fakt, że zapewnienie zeroemisyjnej energii elektrycznej nie zmniejszy emisji BF-BOF, podczas gdy pozwoli niemal do zera zredukować emisje z procesu EAF. Uwzględniając emisje z zakresu 2 oraz, co za tym idzie, strukturę miksu elektroenergetycznego, globalna średnia emisyjność stali produkowanej w procesie EAF ze złomu wynosi ok. 0,68 t CO<sub>2</sub>/t (World Steel Association, 2024) – wciąż ponad dwukrotnie mniej niż w przypadku BF-BOF.

<sup>7</sup> Średnia obliczona na podstawie czterech europejskich projektów ujętych w zestawieniu.



**Wyzwaniem dla polskich producentów stali w technologii EAF jest utrzymanie konkurencyjności cenowej.** Utrudniają to wysokie ceny energii elektrycznej i rosnąca presja ze strony importerów. Niski poziom wykorzystania mocy, sięgający obecnie zaledwie 60%, jest konsekwencją wysokiej różnicy cen między krajową produkcją a tą pochodzącej z importu (Myszor, 2024a). Trudna sytuacja finansowa większości polskich producentów przekłada się również na ich niską zdolność do znaczących inwestycji.

**W Polsce rząd planował rozwinąć moce produkcyjne hut elektrycznych.**

W 2022 r. zapowiedziano budowę nowoczesnej stalowni EAF w Rudzie Śląskiej z zaangażowaniem Skarbu Państwa. Projekt miał być realizowany przez Węglokoks S.A., oficjalnie wspierało go również Ministerstwo Aktywów Państwowych. Zapowiadano, że huta będzie w stanie rocznie produkować 1 mln ton stali. Jej budowa miała ruszyć w 2023 r. i trwać do 2027 r. (Węglokoks, 2022). Brak aktywności nowego rządu w tej sprawie oraz nierozpoczęcie inwestycji wskazuje, że jej realizacja została zawieszona (bankier.pl, 2024)

## 2.4. Opcja 4. Import zielonej stali

Możliwy jest także scenariusz, w którym Polska zamiast inwestować we własne moce wytwórcze będzie polegać na imporcie zdekarbonizowanej stali. Import może też być odpowiedzią na problemy okresu przejściowego do czasu, kiedy zaczną działać odpowiednie krajowe moce produkcyjne zielonej stali.

**Polskie huty już dzisiaj nie są w stanie zaspokoić krajowego popytu na stal.**

W 2022 r. wielkość krajowej produkcji pokrywała 56% krajowego zużycia (Bukowski, Bocian, 2024). Polska jest więc dużym stopniu zależna od stali importowanej, a zależność ta może się pogłębić, jeśli nie zdekarbonizujemy produkcji stali. W takim scenariuszu, z uwagi na rosnący koszt uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, krajowe zakłady produkcyjne dostarczałyby materiał coraz mniej konkurencyjny cenowo w porównaniu do importowanej stali z zagranicy, nawet wliczając koszty jej transportu. Spowodowałoby to spadek wykorzystania mocy, a w następstwie rentowności produkcji stali w Polsce, co z kolei mogłoby wymusić zamknięcia polskich stalowni (zwłaszcza wysokoemisyjnej huty w Dąbrowie Górniczej).

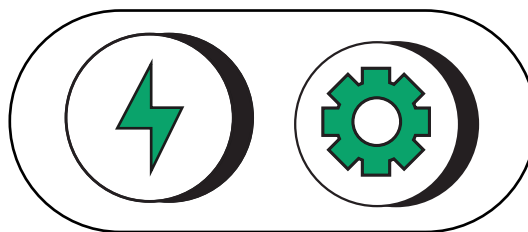
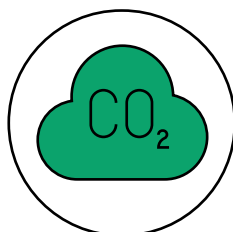
**Scenariusz, w którym Polska zdaje się na import stali, nie jest nieprawdopodobny.** Świadczy o tym dotychczasowa historia polskiego sektora stali.

Wzrost importu stali do Polski rozpoczął się po 1989 r., gdy krajowe huty zaczęły konkurować z zagranicznymi na międzynarodowym rynku. Po epoce komunizmu zakłady nie były przygotowane do rywalizowania z zagraniczną konkurencją. Obok nieproporcjonalnie rozbudowanych mocy produkcyjnych oraz hojnego dotowania produkcji stali przez państwo w przeszłości, przyczyną niskiej konkurencyjności polskiej stali były m.in. zapóźnienia technologiczne. Konieczna była restrukturyzacja polskiego hutnictwa, która z jednej strony oznaczała zmniejszenie produkcji i otwarcie się na import, ale z drugiej pozwoliła unowocześnić proces technologiczny i zachować część produkcji stali w Polsce (Rada Ministrów RP, 2001).

**Droga energia i niedostosowanie technologiczne mogą sprawić, że polski sektor stali znów przegra z zagraniczną konkurencją.** Producenci nisko- lub zeroemisyjnych alternatyw pozostają aktywni. W Niemczech, czyli u naszego głównego zagranicznego dostawcy stali, w fazie realizacji są trzy projekty hut DRI (tabela 1). Do wyścigu o dominację na rynku zdekarbonizowanej stali, również w Europie, mogą dołączyć nowi gracze z Bliskiego Wschodu i Afryki Północnej (IEEFA, 2023; GMK Center, 2023; Trollip i in., 2022; Hermwille, 2022). Hutnictwo w krajach arabskich już dziś opiera się w dużej mierze na technologii bezpośredniej redukcji żelaza (DRI), ale z wykorzystaniem gazu ziemnego zamiast wodoru (w roli reduktora). Ten obszar geograficzny wykazuje się jednak dużym potencjałem produkcji wodoru dzięki wysokiej dostępności energii słonecznej, co stwarza sprzyjające warunki dla dekarbonizacji tamtejszej stali.



**Stal jest materiałem strategicznym i będzie nim w przyszłości.** To materiał ważny dla produkcji zbrojeniowej, wytwarzania zielonych technologii czy inwestycji infrastrukturalnych i budowlanych. Import stali do Polski zapewne zawsze będzie konieczny, m.in. z powodu braku dostępu do rudy żelaza, niezbędnej do wytworzenia stali pierwotnej. Powstaje jednak pytanie z dziedziny bezpieczeństwa: czy i w jakim stopniu Polska może zrezygnować z autonomii w zakresie produkcji tak strategicznego materiału i zdać się na partnerów handlowych?



# 3. Produkcja nisko- i zeroemisyjnej stali – kalkulator kosztów produkcji

**Ile może kosztować produkcja zielonej lub zdekarbonizowanej stali w Polsce?** Udzielamy odpowiedzi na to pytanie na podstawie przeprowadzonej analizy i modelowania struktury kosztów produkcji stali dla trzech wybranych opcji technologicznych i podporządkowanych im scenariuszy, szerzej opisanych w rozdziale drugim<sup>8</sup>. Szczegółową ich konfigurację przedstawiamy w tabeli 2.

**TABELA 2. Przegląd opcji technologicznych i scenariuszy dekarbonizacji**

Opcja technologiczna	Scenariusz dekarbonizacji
<b>1. DRI-EAF + H<sub>2</sub></b>  Bezpośrednia redukcja żelaza (ang. <i>direct reduction of iron</i> , DRI) z wykorzystaniem wodoru jako reduktora i elektrycznego pieca łukowego (ang. <i>electric arc furnace</i> , EAF), które tworzą razem hutę zintegrowaną	1.1 Lokalizacja na północy Polski w strefie przyspieszonego rozwoju OZE ( <i>greenfield</i> )
	1.2. Lokalizacja w Dąbrowie Górniczej ( <i>brownfield</i> )
<b>2. BF-BOF</b>  Układ wielki piec–konwertyler tlenowy ( <i>Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace</i> ) w Dąbrowie Górniczej	2.1. Wyposażenie huty w instalację wychwytu CO <sub>2</sub> (CCS) i transport sprężonego CO <sub>2</sub> koleją w kierunku składowisk
	2.2. Wyposażenie w instalację wychwytu CO <sub>2</sub> (CCS) i transport sprężonego CO <sub>2</sub> rurociągiem w kierunku składowisk
	2.3. Brak instalacji wychwytu CO <sub>2</sub>
<b>3. EAF</b>  Elektryczny piec łukowy	3.1. Lokalizacja huty w Dąbrowie Górniczej ( <i>brownfield</i> )
	3.2. Lokalizacja huty na północy Polski w strefie przyspieszonego rozwoju OZE ( <i>greenfield</i> )

Źródło: opracowanie własne Instrat.

<sup>8</sup> Ze względu na istotną rozbieżność szacunków dotyczących kosztów produkcji zdekarbonizowanej stali, np. w krajach południa Europy, postanowiliśmy nie zestawiać czwartej, ostatniej z opcji (import zielonej stali) z pozostałymi, także ze względu na sytuację na rynku związaną z wchodzeniem w życie CBAM.

**Podstawę obliczeń stanowi autorska adaptacja modelu kosztów produkcji stali opracowanego przez think tank Agora Industry.** Celem obliczenia kosztów produkcji stali w wykorzystaliśmy uznane w branży narzędzie *Carbon Contracts for the transformation of industry: Calculator for the assessment of transformation costs for low-CO<sub>2</sub> primary steel production* (Agora Industry i in., 2022). Interaktywny kalkulator w postaci preuzupełnionego arkusza kalkulacyjnego Excel (model kosztów produkcji) został opracowany przez think tank Agora Industry we współpracy z instytutem badawczym Wuppertal Institut oraz firmą konsultingową Future Camp.

Poddaliśmy jednak istniejące narzędzie istotnej adaptacji i rekonfiguracji, tworząc nowe komponenty obliczeniowe uwzględniające:

- 1 instalację wytwarzania wodoru – dodaliśmy moduł dotyczący działalności elektrolizerów w opcji technologicznej nr 1 (DRI- EAF + H<sub>2</sub>) celem obliczania ceny wodoru (endogenicznie w ramach modelu, a nie jako zewnętrznego surowca) na podstawie tej samej ceny zakupu energii elektrycznej, co dla samej huty, oraz
- 2 instalację wychwytu CO<sub>2</sub> oraz usługę jego transportu i składowania (opcja technologiczna nr 2).

Kolejnym istotnym rozszerzeniem jest pokazanie uproszczonego rachunku kosztowego i inwestycyjnego, niedostępnego w pierwotnej wersji narzędzia<sup>9</sup>. Gotowa wersja naszego kalkulatora z wynikami opisanymi w niniejszym rozdziale dostępna jest do pobrania na stronie Fundacji Instrat pod adresem wskazanym w stopce redakcyjnej (Hetmański i in., 2024).

### 3.1. Założenia i definicja scenariuszy

Tabela 3 przedstawia wybrane, kluczowe założenia techniczno-ekonomiczne oraz finansowe rozważanych scenariuszy dekarbonizacji produkcji stali. Ich szczegółowa dokumentacja znajduje się w kalkulatorze kosztów produkcji stali, który stanowi podstawę niniejszego opracowania, dostępną do pobrania pod adresem wskazanym w stopce redakcyjnej niniejszego opracowania (Hetmański i in., 2024).

---

<sup>9</sup> Autorzy niniejszego raportu dziękują zespołowi Agora Industry, Wuppertal Institut oraz firmie Future Camp za wykonaną pracę i popularyzację narzędzia na zasadzie otwartej licencji. Autorzy oryginalnego modelu nie ponoszą odpowiedzialności za modyfikacje wykonane przez Instrat.

**TABELA 3. Kluczowe założenia kosztowe i techniczne do kalkulatora kosztów produkcji stali**

Założenia	Opcja technologiczna i scenariusz dekarbonizacji	Opcja 1. DRI-EAF + H <sub>2</sub>		Opcja 2. BF-BOF			Opcja 3. Nowy EAF	
		1.1. lokalizacja na północy Polski	1.2. lokalizacja w Dąbrowie Górniczej	2.1. CCS – CO <sub>2</sub> transportowane koleją	2.2. CCS – CO <sub>2</sub> transportowane rurociągiem	2.3. brak CCS	3.1. lokalizacja w Dąbrowie Górniczej	3.2. lokalizacja na północy Polski
Parametry zakładu	Maksymalne roczne moce produkcyjne (mln ton)	2,5		4,5			2,5	
	Roczna produkcja (mln ton) [% wykorzystania mocy produkcyjnych]	2,0 [80%]		3,6 [80%]			2,0 [80%]	
CAPEX – nakłady inwestycyjne	Koszt budowy zakładu (mld euro)	2,4	2,0	-			1,6	2,0
	Nakłady odtworzeniowe (% kosztów zmiennych, w tym kosztów CO <sub>2</sub> )	-		5%			-	
Finanse	Okres amortyzacji (lata)	20		1			20	
	Stopa procentowa (%)			6%				
OPEX – kluczowe surowce nieenergetyczne	Ruda żelaza	Cena (euro/t)	160	120			-	
		Zużycie (t/t stali)	1,5	1,4			-	
	Żłom	Cena (euro/t)	300	300			300	
		Zużycie (t/t stali)	0,17	0,2			1,2	
OPEX – surowce energetyczne	Koks	Cena (euro/t)	-		300			300
		Zużycie (t/t stali)	-		0,4			0,02
	Pył węglowy	Cena (euro/t)	-		100			-
		Zużycie (t/t stali)	-		0,17			-
	Gaz ziemny	Cena (euro/MWh)	40		40			40
		Zużycie (MWh/t stali)	0,57	0,17		0,50		
OPEX – energia elektryczna i wodór	Zużycie energii elektrycznej (MWh/t stali)	0,7		-			0,75	
	Efektywna cena zakupu i przesyłu energii elektrycznej (euro/MWh)	74	78	-			78	74
	Jednostkowy koszt wytworzenia wodoru (euro/kg H <sub>2</sub> )	4,56	4,77	-			-	
Zarządzanie emisjami CO <sub>2</sub>	Cena usługi wychwytu, transportu i składowania CO <sub>2</sub> (euro/t CO <sub>2</sub> )	-		130	110	-	-	
	Bezpośrednie emisje CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> /t stali)	0,04		1,9			0,06	
	Sprawność wychwytu CO <sub>2</sub> przez instalację CCS (%)	-		75%			-	
	Koszt uprawnień do emisji CO <sub>2</sub> (euro/t CO <sub>2</sub> )			300				

Źródło: opracowanie własne Instrat – szczegółowe założenia kosztowe i odwołania do źródeł danych w dokumentacji kalkulatora kosztów produkcji znajduje się w załączniku do raportu.

Ceny realne z 2023 r.

Koszt wytworzenia wodoru został obliczony w modelu (jako zmienna endogeniczna), a nie przyjęty jako założenie o stałej wartości. Koszt usługi CCS został natomiast w całości przyjęty jako założenie o stałej wartości na podstawie literatury (CATF, 2022). Koszt ten uwzględnia koszt kapitału, koszty operacyjne i koszt energii, które jednak pozostają niezależne od innych wartości w kalkulatorze.

**Przyjmujemy długi horyzont inwestycyjny dla wszystkich opcji dekarbonizacyjnych.** Aby uśrednić wszystkie inwestycje do jednego wspólnego mianownika, przyjmujemy założenie o funkcjonowaniu trzech opcji technologicznych w długim terminie – w roku 2040 i dalej w latach 40. Ma to wpływ na przyjmowane przez nas założenie dotyczące cen zakupu energii elektrycznej oraz uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>.

Inwestycje w huty zdekarbonizowanej stali mogą jednak rozpocząć się wcześniej. Niebagatelną rolę w ich przyspieszeniu odgrywa państwo. Zanim wzrost kosztów emisji CO<sub>2</sub> sprawi, że nisko lub prawie zeroemisyjne technologie produkcji stali pierwotnej staną się konkurencyjne wobec technologii BF-BOF (bez CCS), rząd może wdrożyć węglowe kontrakty różnicowe (ang. *Carbon Contracts for Difference*). Taki kontrakt w uproszczeniu pokrywałby producentowi zielonej stali jego stratę wobec producenta stali konwencjonalnej (ramka 2).



### ZUŻYCIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Na podstawie literatury oraz modelu Agora Industry (2022) przyjmujemy, że opcje technologiczne nr 1 (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) oraz nr 3 (EAF) cechują się podobnym zużyciem energii elektrycznej w przedziale 0,7–0,75 MWh na 1 tonę stali. Dla opcji nr 2 (BF-BOF) przyjmujemy również, analogicznie do modelu Agory, że efektywne zużycie energii elektrycznej wynosi 0 MWh na 1 tonę stali.



### KOSZT ZAKUPU ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Na podstawie modelowania polskiego mixu energetycznego przez In strat (Kubiczek i in., 2023) jako cenę zakupu energii elektrycznej przyjmujemy średni koszt wytworzenia energii elektrycznej w 2040 r. (czyli uwzględniamy koszt kapitału), który według tego modelowania wynosi 284 zł MWh (po przeliczeniu wg właściwego kursu walutowego i zaokrągleniu 65 euro/MWh)<sup>10</sup>. To znacznie mniej niż wynika to z obecnie obserwowanych na giełdzie energii wartości kontraktów długoterminowych lub kontraktów PPA.

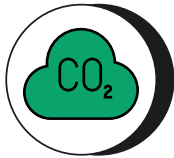


### KOSZT PRZESYŁU ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Równocześnie przyjmujemy utrzymanie się na obecnym poziomie wysokości stawek opłaty przesyłowej, zakładając powrót do obecnych wartości po fali inwestycyjnej lat 20. i 30. XXI w. Po uwzględnieniu części stawki przesyłowej uwzględniającej moc przyłącza i przeliczeniu stawek wyrażonych w złotych na euro osiągamy efektywną stawkę przesyłu energii elektrycznej na poziomie 13,3 euro/MWh.

<sup>10</sup> W scenariuszu ambitnym, który zakłada ambitny rozwój OZE i energetyki jądrowej (scenariusz S1).

Przyjmujemy arbitralne założenie o udzieleniu 30% rabatu na stawkę opłaty przesyłowej PSE dla inwestycji dla przemysłów energochłonnych, takich jak huty stali, lokalizowanych w strefach przyspieszonego rozwoju OZE, przede wszystkim na północy Polski. Nasze podejście opiera się na założeniu, że po odpowiedniej reformie, prawo pozwoli stosować sygnały cenowe dla odbiorców energii elektrycznej zlokalizowanych bliżej wytwórców, np. blisko węzłów energetycznych przy morskich farmach wiatrowych i elektrowni atomowej. Wtedy efektywna stawka przesyłu spada do poziomu 9,3 euro/MWh.



## KOSZT UPRAWNIENÍ DO EMISJI CO<sub>2</sub>

Na podstawie modelowania ścieżek redukcji emisji GHG w europejskiej i polskiej gospodarce autorstwa CAKE (Pyrka i in., 2023) przyjmujemy wartość uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> na poziomie 300 euro/t w 2040 r. (po zaokrągleniu) jako średnią z wartości na 2030 r. (180 euro/t) i 2050 r. (440 euro/t).

Ewolucja tych wartości w czasie, a w szczególności dalszy potencjalny spadek cen energii elektrycznej i wzrost uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, pozwalają na analizę tego, czy parytet cenowy pomiędzy różnymi opcjami dekarbonizacji stali nie zmienia się w czasie na korzyść opcji 1 (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) kosztem opcji 2 (BF-BOF + CCS) – wyniki te są przedstawione w podrozdziale zawierającym analizę wrażliwości (3.3.).

**Nie dodajemy narzutów, marż lub innych form zysków w żadnej z opcji technologicznych.** W długim terminie zakładamy, że każdy z surowców nieenergetycznych (np. ruda żelaza, złom) oraz surowców i nośników energetycznych (np. Koks, energia elektryczna) dostarczanych do huty uwzględnia już marżę jego producenta. Nie modelujemy również przychodów i cen sprzedaży stali w różnych opcjach technologicznych – każdy z typów stali będzie miał inne parametry (w tym emisyjność) i będzie wyceniany według różnych zasad rynkowych oraz osiągnie różne marże.

**Chcąc zachować obiektywność porównania oraz neutralność technologiczną, stoimy przed wyzwaniem sprowadzenia kilku technologii do wspólnego mianownika.** Podejmujemy więc kilka kluczowych założeń dotyczących konfiguracji inwestycji wspierających proces produkcji stali. Przyjmujemy, że usługa dostarczenia wodoru (opcja nr 1 – DRI-EAF + H<sub>2</sub>) oraz wychwytu, transportu i składowania CO<sub>2</sub> (opcja nr 2 – BF-BOF + CCS) dostarczana jest przez oddzielne od huty stali wyspecjalizowane przedsiębiorstwo, które podpisałoby ze swoim klientem (hutą) umowę na długoterminową dostawę usługi lub produktu.

Celem jest odciążenie producenta stali od ponoszenia nakładów kapitałowych i konieczności specjalizacji w sektorze, który może, ale nie musi być traktowany jako składowa część huty. Delegacja takiej działalności (w porównaniu z domyślną formułą in-house) jest praktyką w branży. Przyjmujemy tym samym założenie o rozwoju regulacji w zakresie zarówno gospodarki wodorowej, jak i usług CCS.

**W opcji technologicznej 1 (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) przyjmujemy założenie o produkcji wodoru w pobliżu huty.** Nie byłby on jednak wytwarzany przez samo przedsiębiorstwo operujące hutą. Analiza projektów hut DRI w Europie (tabela 1) wskazuje, że budowa elektrolizerów nie musi być częścią nakładów inwestycyjnych samej huty, ale może stanowić część rachunku oddzielnego przedsiębiorstwa energetycznego, które zawiera z hutą długoterminową umowę na dostawę wodoru. Tym samym liczymy w modelu (endogenicznie) koszt produkcji wodoru, ale nakłady inwestycyjne na elektrolizer (ok. 1/4 wartości CAPEX dla huty DRI) nie są wliczane do rachunku kosztów produkcji stali w części dotyczącej CAPEX, chociaż zostały ujęte w jednostkowym koszcie wytworzenia wodoru jako jednego z kluczowych surowców i nośników energetycznych. Szacowane koszty produkcji wodoru zawierają się w przedziale 4,56–4,77 euro/kg<sup>11</sup>. Nie zakładamy kosztów transportu wodoru ani jego składowania ze względu na lokalną produkcję.

**W opcji 2 (BF-BOF) przyjmujemy analogiczne założenie o dostarczeniu usługi wychwytu, transportu i składowania CO<sub>2</sub>.** Zajmowałoby się tym zewnętrzne wyspecjalizowane przedsiębiorstwo<sup>12</sup>. Przyjmujemy koszt usługi CCS z interaktywnego kalkulatora *The cost of carbon capture and storage in Europe* opracowanego przez think tank Clean Air Task Force oraz firmę Carbon Limits (CATF, 2022). Znajdują się w nim szacowane koszty usługi CCS w rozbiciu na składowe (wychwytywanie, transport i składowanie). Koszt ten uwzględnia również amortyzację nakładów kapitałowych (w okresie 20 lat, podobnie jak w naszym modelu) oraz koszty operacyjne, w tym koszty energii. Kalkulator określa również szacowaną sprawność dla praktycznie wszystkich europejskich zakładów przemysłowych, w tym zakładów ArcelorMittal Dąbrowa Górnicza oraz przyzakładowej elektrociepłowni TAMEH ZW Nowa. Autorzy kalkulatora (CATF, 2022) założyli zastosowanie w hucie w Dąbrowie Górniczej i w elektrociepłowni TAMEH ZW Nowa technologii absorpcji aminowej do wychwytu CO<sub>2</sub> i dla tej technologii dokonali wszystkich obliczeń.

Szacowane koszty usługi CCS przyjmujemy jako średnią ważoną sumą emisji każdego z dwóch ww. zakładów (co oznacza świadczenie usługi CCS dla obu z nich) i dochodzimy do wartości (po zaokrągleniu):

- 130 euro/t CO<sub>2</sub> dla scenariusza 2.1. BF-BOF + CCS, w którym CO<sub>2</sub> jest transportowane koleją,
- 110 euro/t CO<sub>2</sub> dla scenariusza 2.2. BF-BOF + CCS, w którym CO<sub>2</sub> jest transportowane rurociągiem.

---

11 Należy wziąć pod uwagę, że technologia produkcji stali z wykorzystaniem wodoru jako reduktora jest nową technologią, która dopiero wchodzi kluczową fazę komercjalizacji. To powoduje, że obliczenia związane z nakładami inwestycyjnymi oraz operacyjnymi mogą się w rzeczywistości istotnie zmieniać.

12 Polityka klimatyczna Grupy Orlen z maja 2023 r. zakłada rozwój zdolności CCUS (w tym usługi CCUS) do poziomu 3 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie (Orlen, 2023).



Tym samym, analogicznie do opcji nr 1, koszt kapitałowy dla tej instalacji ujęty jest nie w rachunku huty stali, ale w koszcie usługi oferowanej przez zewnętrznego dostawcę na jej rzecz.

### **Założenia inwestycyjne (CAPEX) oparto na globalnej analizie projektów inwestycyjnych oraz sprawozdań finansowych ArcelorMittal Poland.**

Źródłem informacji o kosztach powstających inwestycji w huty DRI-EAF jest analiza niemieckiego instytutu badawczego DIW Berlin (Hüttelm, Lehner, 2024). Wybraliśmy próbkę reprezentatywnych projektów z krajów europejskich i osiągnęliśmy średnią (po zaokrągleniu) na poziomie:

- 780 euro za 1 tonę mocy wytwórczych dla opcji 1 (DRI-EAF + H<sub>2</sub>),
- 630 euro za 1 tonę mocy wytwórczych dla opcji 3 (EAF).

Dokonujemy jednak istotnej modyfikacji uwzględniając różnicę między projektami typu *greenfield* (lokalizacja na północy Polski) oraz *brownfield* (inwestycja w miejscu lokalizacji huty ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej). W naszym modelu dokonujemy arbitralnego podwyższenia wartości CAPEX z analizy DIW Berlin o dodatkowe 25% dla inwestycji typu *greenfield* w celu odzwierciedlenia koniecznych do poniesienia nakładów inwestycyjnych na zakup działki inwestycyjnej oraz uzbrojenie jej w odpowiednią infrastrukturę (w szczególności przyłącze energetyczne do odbioru energii elektrycznej).

**Sprowadzamy do wspólnego mianownika różne moce produkcyjne zakładów w poszczególnych scenariuszach.** Choć niektóre technologie okazują się bardziej konkurencyjne kosztowo od innych w ujęciu jednostkowego kosztu wytworzenia stali, to pozwalają na produkcję stali w różnych wolumenach. W opcjach 1 (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) oraz 3 (EAF) zakładamy mniejsze moce produkcyjne niż w opcji nr 2 (BF-BOF + CCS) – odpowiednio 2,5 mln ton oraz 4,5 mln ton<sup>13</sup>.

## **3.2. Wyniki modelowania – konkurencyjność opcji technologicznych**

Wyniki modelowania przedstawiamy w postaci jednostkowego kosztu produkcji stali wyrażonego w cenach realnych z 2023 r. (euro'2023) na tonę stali. W każdym scenariuszu koszty ujmujemy w pięciu kategoriach:

- nakłady inwestycyjne (CAPEX),
- koszty operacyjne surowców nieenergetycznych (OPEX – surowce nieenergetyczne),
- koszty operacyjne związane z energią i surowcami energetycznymi (OPEX – energia),
- koszty operacyjne związane z emisją CO<sub>2</sub>, w tym koszty usługi CCS (OPEX – CO<sub>2</sub>),
- pozostałe koszty operacyjne (OPEX – pozostałe).

---

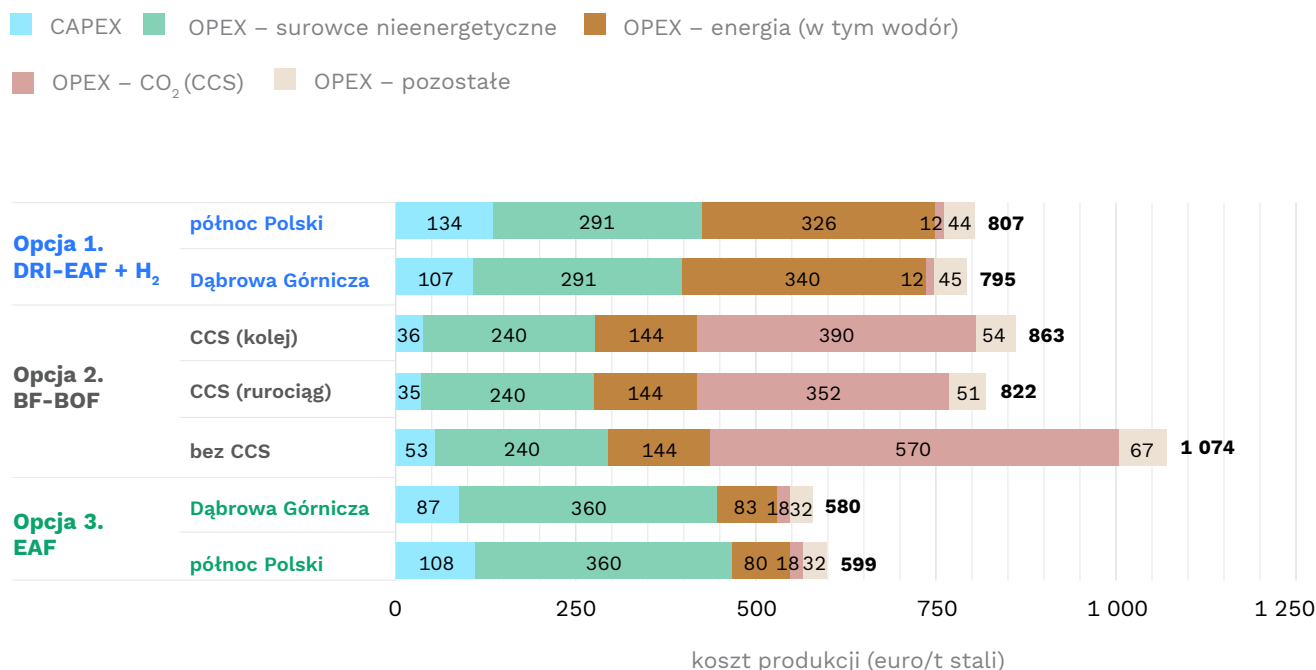
<sup>13</sup> Dla hut zelektryfikowanych ograniczeniem jest przepustowość elektrycznego pieca łukowego. W przypadku technologii BF-BOF (+ CCS) zdolność produkcyjna wynosi w naszym modelu 4,5 mln ton stali i odpowiada aktualnym mocom huty ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej.

### 3.2.1. Porównanie całkowitych jednostkowych kosztów produkcji stali

**Produkcja stali w technologiach prawie zeroemisyjnych (DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz EAF) może być tańsza niż w hucie BF-BOF, nawet z zastosowaniem technologii CCS.** Koszt wyprodukowania jednej tony stali w technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> (scenariusze 1.1. i 1.2.) pozostawałby w naszym modelu niższy o kwotę rzędu 15–68 euro/t stali w porównaniu do scenariuszy BF-BOF + CCS (scenariusze 2.1. i 2.2.). Wynika to głównie z kosztów usługi CCS oraz niewystarczającej sprawności instalacji wychwytywania CO<sub>2</sub> (75%). Przy wysokich cenach uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> przełoży się to na znaczący dodatkowy koszt niewychwyconych emisji CO<sub>2</sub> (wykres 3).

Najdroższe będzie utrzymanie dzisiejszego procesu produkcji stali pierwotnej w niezmienionej formie (scenariusz 2.3.). Wytopiona w nim stal kosztowałaby prawie 1 100 euro/t i byłaby droższa o ok. 270–280 euro/t stali w porównaniu do scenariuszy wodorowych (1.1. i 1.2.) oraz prawie dwukrotnie droższa niż ta uzyskana ze złomu w elektrycznym piecu łukowym (scenariusze 3.1. oraz 3.2.), nawet gdyby był on wybudowany od podstaw (wykres 3).

**WYKRES 3. Struktura kosztów produkcji stali w różnych opcjach technologicznych (euro/t stali)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

**Koszt produkcji stali w hucie wybudowanej od zera nie będzie zresztą znacząco wyższy niż w przypadku realizacji takiej inwestycji w formule *brownfield*.** Różnica między tymi dwiema opcjami na korzyść scenariusza *brownfield* wynosi tylko 11 euro/t stali w przypadku ścieżek wodorowych (1.1. oraz 1.2.) i 19 euro/t stali w przypadku elektrycznego pieca łukowego (scenariusze 3.1. oraz 3.2.).

Oszczędności na koszcie przesyłu energii elektrycznej, wynikające z położenia zakładu *greenfield* w strefie przyspieszonego rozwoju OZE, w dużej części zrekompensowałyby koszt dodatkowego kapitału wymaganego przy budowie huty od podstaw na nowym, niezbrojonym terenie inwestycyjnym. Szczególnie korzysta na tym w naszym modelu huta DRI-EAF + H<sub>2</sub> zlokalizowana na północy Polski, gdyż koszty wodoru są w tym scenariuszu (1.1.) niższe o 12 euro na tonę stali w porównaniu do takiej samej huty zlokalizowanej w Dąbrowie Górniczej (scenariusz 1.2. oraz wykres 4).

W razie wyboru technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> jako ścieżki dekarbonizacji polskiej produkcji stali, nowa wytwórnia stali pierwotnej wcale nie musiałaby bazować na dotychczasowej lokalizacji huty zintegrowanej w Dąbrowie Górniczej.

### **Zdecydowanie najniższy jest koszt produkcji stali w technologii EAF.**

W zależności od scenariusza *greenfield* lub *brownfield* wynosi on odpowiednio 599 euro/t stali albo 580 euro/t stali. Koszt ten jest niższy od kosztów produkcji stali w hucie DRI-EAF + H<sub>2</sub> (scenariusze 1.1. oraz 1.2.) o kwotę w przedziale 196–227 euro/t stali oraz o kwotę rzędu 223–283 euro/t stali w porównaniu do scenariuszy BF-BOF + CCS (scenariusze 2.1. oraz 2.2.). W przypadku zestawienia ze scenariuszem BF-BOF bez CCS (2.3.) koszt produkcji stali elektrycznej z odzysku jest blisko dwa razy niższy, tj. różnica ta może osiągnąć nawet ponad 490 euro/t stali na korzyść stali elektrycznej z odzysku.

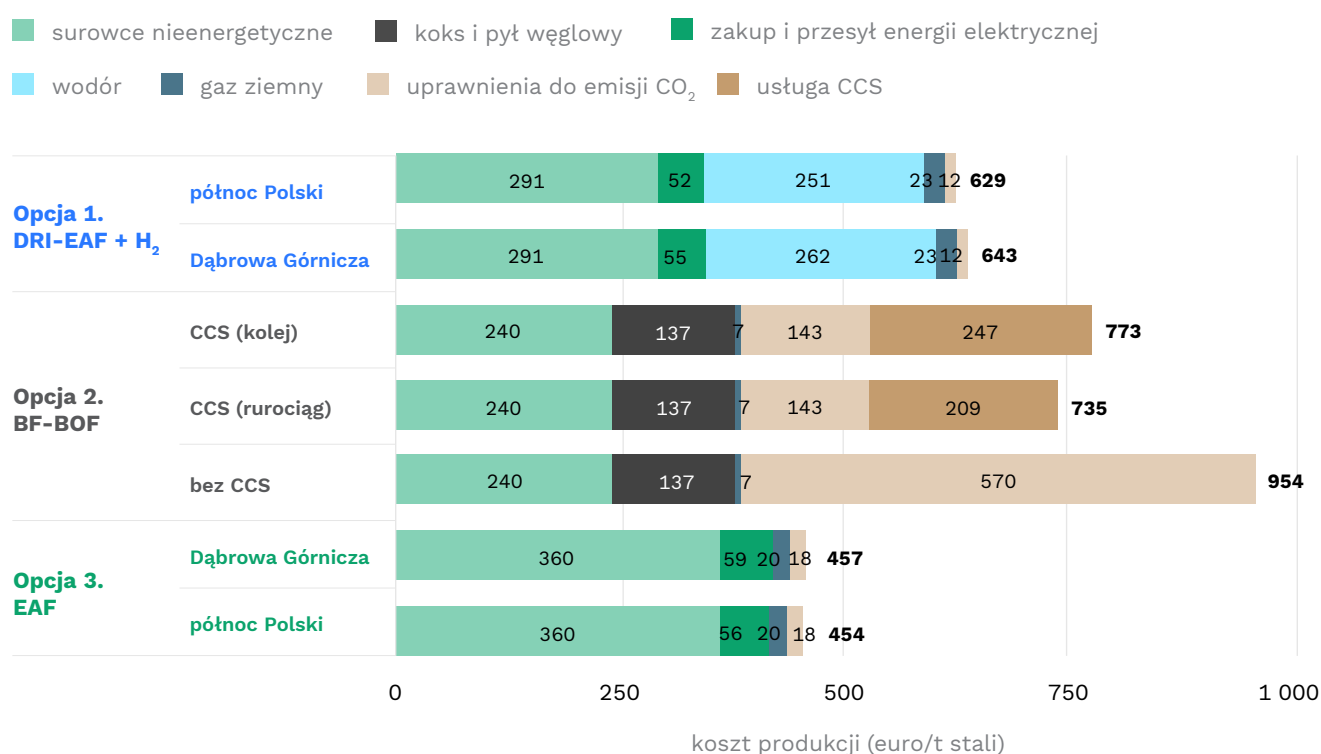
Technologia EAF, choć wygrywa pod względem kosztów produkcji, nie dostarcza jednak stali pierwotnej. Realizacja scenariusza EAF wymagałaby więc podjęcia decyzji, że stal pierwotną Polska będzie wyłącznie importować, a moce produkcyjne wysokoemisyjnej huty zintegrowanej w Dąbrowie Górniczej zostaną z uwagi na wysokie koszty emisji CO<sub>2</sub> zastąpione prawie zeroemisyjnym elektrycznym piecem łukowym.

### **3.2.2. Koszty energetyczne i związane z emisją CO<sub>2</sub>**

**Koszty zarządzania CO<sub>2</sub> w hucie BF-BOF + CCS mogą być większe niż wszystkie koszty energetyczne dla huty DRI-EAF + H<sub>2</sub>,** w tym koszty wodoru. Koszty emisji, wychwytu, transportu oraz składowania CO<sub>2</sub> wynoszą w scenariuszach BF-BOF + CCS 390 euro/t stali (transport CO<sub>2</sub> koleją) i 352 euro/t stali (transport CO<sub>2</sub> rurociągiem), podczas gdy dla scenariuszy wodorowych wszystkie koszty energetyczne, z uwzględnieniem kosztów śladowych emisji CO<sub>2</sub>, wynoszą odpowiednio 338 euro/t stali (huta na północy Polski) i 352 euro/t stali (huta w Dąbrowie Górniczej). Różnica może więc wynieść nawet 52 euro/t stali.

**Konkurencyjność scenariuszy DRI-EAF + H<sub>2</sub> wynika z faktu, że nie wymagają one koksu oraz pyłu węglowego, w przeciwieństwie do technologii BF-BOF + CCS.** Dzięki temu koszt energetyczny wytworzenia stali w technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> będzie według naszego modelowania dodatkowo niższy o 137 euro/t stali w porównaniu do energetycznych kosztów stali pierwotnej wytopionej w wielkim piecu i konwertorze tlenowym. Tych przewag scenariusza wodorowego nad scenariuszem BF-BOF nie niweluje nawet fakt, że ruda żelaza w formie pelletu, w jakiej musi być wykorzystywana w piecu DRI, jest o 40 euro droższa niż zwykła czy spiekana ruda żelaza wymagana w procesie wielkopiecowym (wykres 4).

**WYKRES 4. Struktura kosztów zmiennych produkcji stali w różnych opcjach technologicznych (euro/t stali)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

**Wysokie ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> powodują, że technologia CCS również jest konkurencyjną opcją dekarbonizacji produkcji stali pierwotnej w Polsce.** Choć w scenariuszach uwzględniających CCS wychwyceniu podlega tylko 75% CO<sub>2</sub> (CATF, 2022), to koszt niewychwyconych emisji oraz koszty wychwytu, transportu i składowania CO<sub>2</sub> (usługa CCS) w scenariuszach 2.1. oraz 2.2. łącznie wciąż nie dorównują kosztom zakupu uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> w scenariuszu 2.3., w którym wszystkie emisje są uwalniane do atmosfery. Różnica kosztów zarządzania CO<sub>2</sub> wynosi 218 euro/t stali na korzyść scenariusza 2.1., w którym CO<sub>2</sub> jest transportowany koleją, oraz 180 euro/t stali dla scenariusza 2.2., w którym CO<sub>2</sub> jest wtłaczany do rurociągu. Mniej kosztochłonny (o 38 euro/t stali) jest więc transport wychwyconego CO<sub>2</sub> rurociągiem (wykres 4).

To w technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> realizowana jest jednak obecnie zdecydowana większość projektów dekarbonizacji produkcji stali pierwotnej, co może świadczyć o tym, że scenariusze wodorowe są postrzegane jako bardziej opłacalne. Diagnoza ta pokrywa się z wynikami naszych obliczeń.

**Technologia EAF jest najbardziej konkurencyjna pod kątem kosztów związanych z cenami energii i emisji CO<sub>2</sub>** (wykres 4). Różnica w energetycznych kosztach zmiennych na korzyść stali elektrycznej z odzysku (scenariusze 3.1. oraz 3.2.) zawiera się w przedziale 236–254 euro/t stali w porównaniu do scenariuszy DRI-EAF + H<sub>2</sub> (1.1. oraz 1.2.) oraz w przedziale 394–435 euro/t stali w zestawieniu ze scenariuszami BF-BOF + CCS (2.1. oraz 2.2.). Wobec technologii BF-BOF bez CCS różnica ta osiąga z kolei aż 613 lub 616 euro/t stali w zależności od realizacji scenariusza EAF odpowiednio w formule *brownfield* lub *greenfield*. Elektryczny piec łukowy wykorzystuje jednak złom (zaliczany do surowców nieenergetycznych), który w cenie zakupu jest prawie trzy razy droższy od rudy żelaza. Wysoka cena złomu nie zmienia jednak faktu, że całkowite koszty produkcji stali najniższe są w scenariuszu EAF (3.1. oraz 3.3.). Istotą przewagi technologii EAF nad innymi scenariuszami ujętymi w modelu są więc dużo niższe koszty związane z energią.

### 3.2.3. Energochłonność produkcji stali

Wyzwaniem dla dekarbonizacji hutnictwa stali będzie zapewnienie dużych wolumenów zielonej energii elektrycznej. Wszystkie rozważane przez nas technologie dekarbonizacji produkcji stali w Polsce charakteryzują się bowiem dużym zapotrzebowaniem na energię elektryczną (wykres 5), większym niż dzisiejsza huta BF-BOF w Dąbrowie Górniczej. Dlatego takie znaczenie dla wyników naszego modelowania mają koszty energii.

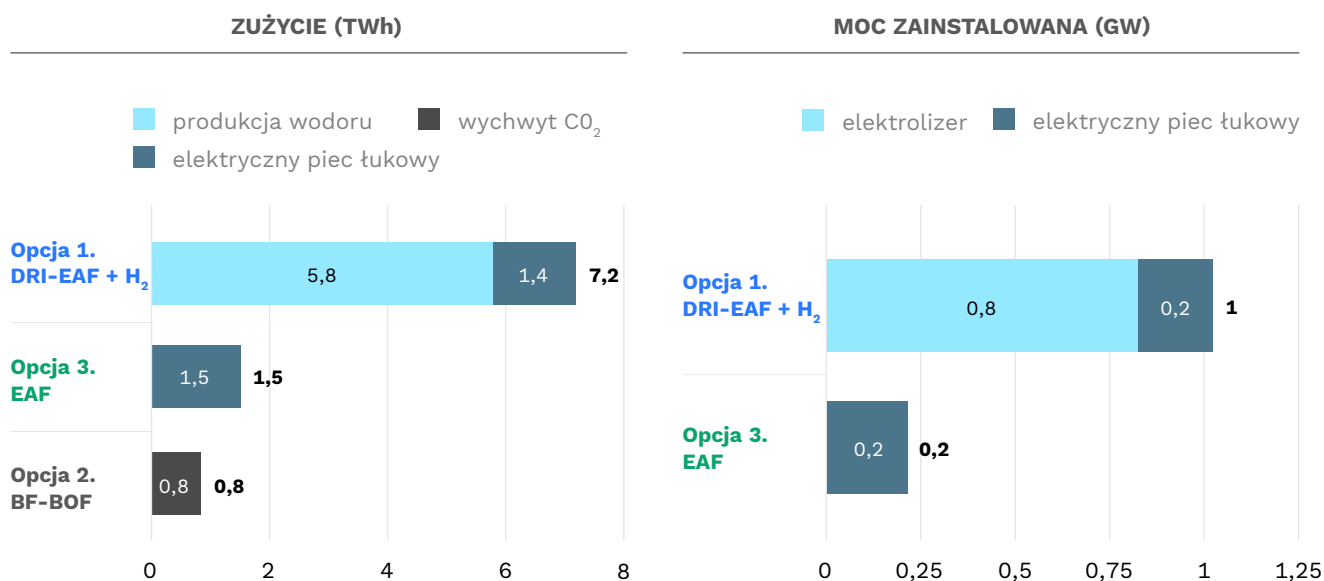
**W związku z elektryfikacją gospodarki zdekarbonizowanej huta stali będzie konkurować o energię elektryczną z innymi sektorami.** Obecne krajowe moce wytwórcze nie wystarczą do zaspokojenia zapotrzebowania na prąd w 2040 r<sup>14</sup>. Potencjalne problemy z rozwojem odpowiednich nowych mocy w odnawialnych źródłach energii premiowałyby więc hutę stali o jak największej efektywności wykorzystania energii elektrycznej. W związku z tym szczegółowo analizujemy nasze scenariusze pod kątem zużycia prądu.

**Technologia EAF, najbardziej konkurencyjna pod kątem kosztów energii, wcale nie konsumuje najmniej energii elektrycznej.** Huta EAF nie wymaga jednak surowców energetycznych, które są w naszym modelu droższe niż energia elektryczna. Odnosi się to szczególnie do wodoru dla huty DRI-EAF + H<sub>2</sub>, którego pozyskanie samo w sobie jest bardzo energochłonne (wykres 5) i przez to kosztowne.

---

<sup>14</sup> Według energetycznego modelowania Instratu krajowa elektryczna moc zainstalowana ma wzrosnąć w scenariuszu ambitnym (S1) prawie trzykrotnie – z 63,6 GW w 2022 r. do 175 GW w roku 2040.

## WYKRES 5. Zużycie energii elektrycznej oraz moc zainstalowana instalacji wykorzystywanych przy produkcji stali w scenariuszach nisko- i prawie zeroemisyjnych



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie Sasiain i in. (2020) oraz Facchini i in. (2021). Zapotrzebowanie na energię elektryczną przez instalację wychwyty obliczyliśmy na podstawie dokumentów źródłowych dla kalkulatora CATF (CATF, 2022; National Petroleum Council, 2021), które podają zużycie energii elektrycznej w wysokości 0,16 MWh/t wychwyconego CO<sub>2</sub> dla założonej przez CATF technologii absorpcji aminowej. W przypadku innych technologii wychwyty CO<sub>2</sub> zużycie elektryczności może się różnić. Ponadto huty w poszczególnych scenariuszach mają różne moce wytwórcze, więc jednostkowe zużycie energii elektrycznej na tonę stali również różni się w zależności od scenariusza.

**Technologia DRI-EAF + H<sub>2</sub> charakteryzuje się największym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.** Według naszego modelu wymaga ona kilkakrotnie większych dostaw energii elektrycznej niż pozostałe technologie dekarbonizacji stali (wykres 5). Zapotrzebowanie na elektryczność w scenariuszach wodorowych (1.1. oraz 1.2.) wynosi 7 TWh energii elektrycznej. To odpowiednio pięć i dziewięć razy więcej niż w scenariuszach EAF oraz BF-BOF + CCS. Dla porównania szacowane zapotrzebowanie na energię elektryczną w rozważanej średniej wielkości hucie DRI-EAF + H<sub>2</sub> na poziomie 7 TWh to również:

- ok. 4,5% dzisiejszej całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce,
- ok. 2% produkcji szacowanej przez Instrat na 2040 r. w scenariuszu ambitnym (S1) (Kubiczek P. i in., 2023),
- ponad dwukrotnie więcej niż dziś wynosi zużycie energii elektrycznej przez największego jej konsumenta w Polsce – KGHM (ok. 3 TWh).

Zdecydowana większość z tych 7 TWh (80%) byłaby konsumowana przez elektrolizery w procesie produkcji wodoru. Taka ilość energii elektrycznej pozwala w naszym modelu na wyprodukowanie 110 tys. ton wodoru. Dla porównania w 2023 r. Polska wytworzyła 729 tys. ton szarego wodoru w procesach rafineryjnych. Instrat w modelowaniu energetycznym szacuje możliwość produkcji zdekarbonizowanego wodoru z nadwyżek produkcji OZE oraz z energii jądrowej w scenariuszu ambitnym na poziomie ok. 1 mln ton wodoru.

**Zaspokojenie zapotrzebowania na energię elektryczną elektrolizera i elektrycznego pieca łukowego w hucie DRI-EAF + H<sub>2</sub> wymagałoby 1 GW mocy zainstalowanej** przyłącza po stronie odbiorcy prądu (wykres 5). Obsługa huty DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz towarzyszącego jej elektrolizera wymagałaby więc w naszym modelu rocznej pracy farmy wiatrowej o mocy 1,5 GW. To więcej niż przykładowa farma wiatrowa Baltic Power o mocy blisko 1,2 GW. Dla porównania potrzebne w tym wypadku 1 GW mogłoby być (w uproszczeniu) zasilone przez blisko 17% mocy zainstalowanej w morskich farmach wiatrowych, które mają być postawione na Bałtyku w ramach I fazy wsparcia do 2030 r. i 9% mocy zainstalowanej w ramach II fazy do roku 2040. Roczna produkcja 2 mln ton stali w technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> wymagałaby więc ogromnego zaangażowania odnawialnych źródeł energii.

**Zastosowanie wychwytu CO<sub>2</sub> w hucie BF-BOF nie byłoby tak energochłonne w porównaniu do innych nisko- i prawie zeroemisyjnych technologii.** W modelowanym scenariuszu, zakładającym wykorzystanie do wychwytu CO<sub>2</sub> technologii absorpcji aminowej, wychwyt CO<sub>2</sub> wymagałby dodatkowych dostaw energii elektrycznej w ilości ok. 0,8 TWh rocznie. Instalacja wychwytu CO<sub>2</sub> zużywałaby w sumie prawie dwa razy mniej energii elektrycznej niż huta EAF (tj. 1,5 TWh; wykres 5), pomimo faktu, że huta BF-BOF + CCS produkowałaby w naszym modelu 3,6 mln ton stali, czyli aż o 1,6 mln ton stali więcej niż huta EAF.

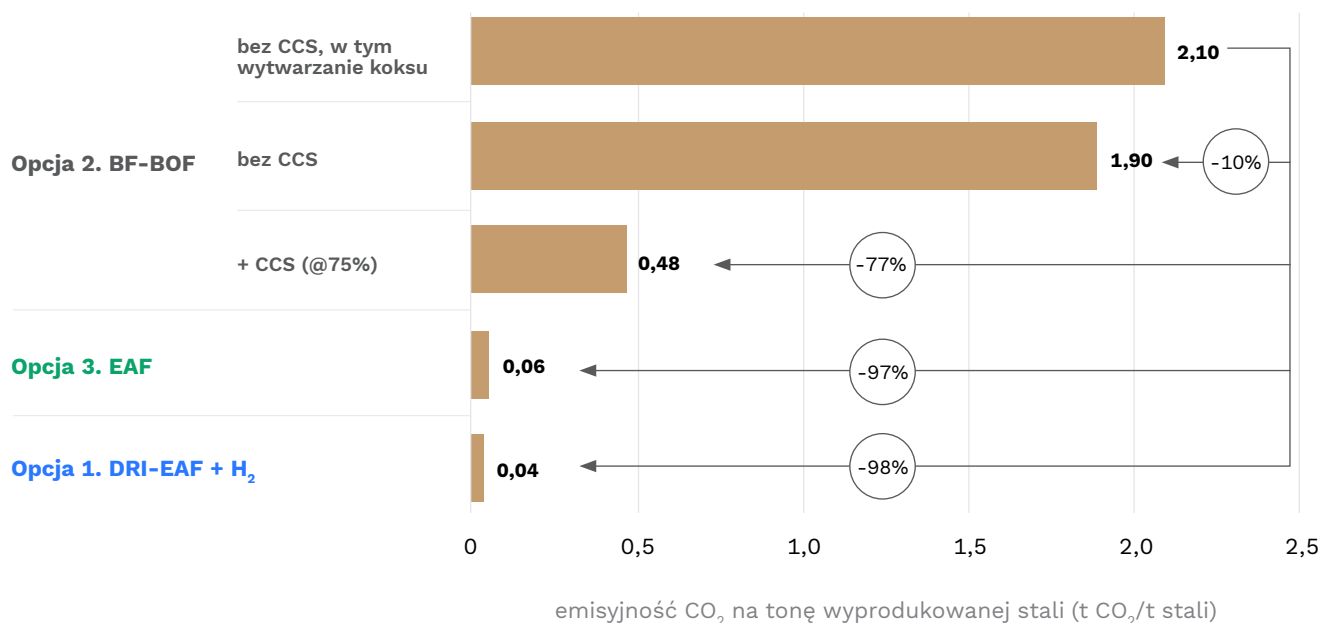
Przewaga efektywności energetycznej instalacji wychwytu CO<sub>2</sub> w porównaniu do elektrycznego pieca łukowego jest więc jeszcze większa. Zużywa ona 0,23 MWh energii elektrycznej w przeliczeniu na tonę stali konwertorowej wyprodukowanej w obsługiwanej przez nią hucie BF-BOF, podczas gdy dla stali elektrycznej (EAF) wartość ta jest prawie trzy razy większa i wynosi 0,75 MWh. Pod względem zapotrzebowania na energię elektryczną scenariusz BF-BOF + CCS jest więc łatwiejszy w realizacji niż scenariusz DRI-EAF + H<sub>2</sub>, a także scenariusz EAF.

#### 3.2.4. Emisyjność

Wysokość emisji CO<sub>2</sub> węgla jest kluczową cechą huty stali w perspektywie roku 2040. Polityka klimatyczna Unii Europejskiej sprawia, że emisja CO<sub>2</sub> staje się coraz bardziej kosztowna i w związku z tym najbardziej konkurencyjne będą huty nisko- lub prawie zeroemisyjne.

Zostało to odzwierciedlone w naszym modelu dzięki uwzględnieniu wzrostu kosztów uprawnień do CO<sub>2</sub> węgla do 300 euro/t w 2040 r. i w latach kolejnych (CAKE, 2023). Koszty tej emisji na tonę stali wynikają m.in. z naszych założeń co do emisyjności poszczególnych technologii i dalszych obliczeń, których wyniki przedstawia wykres 6.

**WYKRES 6. Emisyjność CO<sub>2</sub> produkcji stali w różnych opcjach technologicznych, w przeliczeniu na 1 tonę wyprodukowanej stali (t CO<sub>2</sub>/t stali)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie danych: dla huty BF-BOF w Dąbrowie Górniczej i innych zakładów ArcelorMittal (koksownia Zdzeszowice i towarzysząca jej elektrocieptownia, elektrocieptownia TAMEH ZW Nowa) – EU ETS oraz E-PRTR; dla DRI-EAF + H<sub>2</sub> – Sasiain i in. (2020); dla EAF – Facchini i in. (2021).

**Na znaczną redukcję CO<sub>2</sub> pozwala już technologia BF-BOF + CCS.** Jej emisyjność wynosi 0,48 t CO<sub>2</sub>/t stali i jest o 77% t CO<sub>2</sub>/t stali niższa w porównaniu do konwencjonalnej metody BF-BOF stosowanej dzisiaj w Dąbrowie Górniczej. Z uwagi na niesatysfakcjonującą sprawność wychwytu CO<sub>2</sub> (75%) CCS znajduje się jednak w kategorii emisyjności produkcji stali na przegranej pozycji wobec technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz EAF.

**Elektryczny piec łukowy charakteryzuje się bardzo niską emisją CO<sub>2</sub> na tonę wyprodukowanej stali.** Ten czynnik, poza atrakcyjnością w innych kategoriach kosztowych, powinien przemawiać za masowym stosowaniem technologii EAF. Wyzwaniem jest jednak dostępność złomu. Zwłaszcza, jeżeli produkcja stali miałaby w obliczu wyzwań klimatycznych masowo oprzeć się na elektrycznych piecach łukowych. Odzyskiwanie stali musiałoby wówczas być bardzo efektywne na wszystkich etapach procesu. Ponadto stal elektryczna pozyskiwana wyłącznie ze złomu charakteryzuje się niższą jakością w porównaniu do stali pierwotnej produkowanej w technologii BF-BOF oraz DRI-EAF.

**Na największą redukcję CO<sub>2</sub> w przeliczeniu na tonę wyprodukowanej stali surowej pozwala huta DRI-EAF + H<sub>2</sub> (scenariusz 1. na wykresie 6).** Jest to więc najbardziej przyjazne klimatowi rozwiązanie, a także jedyna prawie zeroemisyjna technologia produkcji stali pierwotnej – mniej zanieczyszczona i wytrzymalsza niż stal elektryczna z pieców EAF.



### 3.3. Analiza wrażliwości

Wyniki kalkulatora w znacznym stopniu zależą od zmiennych, których wartość jest trudna do przewidzenia, zwłaszcza w perspektywie 2040 r., dla której został sporządzony. Dlatego przeprowadziliśmy analizę wrażliwości i zbadaliśmy, jak zmiana kluczowych wartości wejściowych wpływa na wynik modelu i koszt produkcji stali. Za najistotniejsze dla obliczeń i najbardziej podatne na wahania lub niepewności czynniki uznaliśmy:

- koszt zakupu i przesyłu energii elektrycznej – z uwagi na istotny potencjalny wpływ tego czynnika na nasz model wytwarzania wodoru oraz przez wzgląd na niepewność co do ewolucji polskiego miksu elektroenergetycznego, zmiany na rynku energii elektrycznej, w tym kształtowanie się kosztów sieciowych oraz ryzyka związane z prowadzeniem wielkoskalowych inwestycji w produkcję wodoru,
- stopa procentowa – z uwagi na nieprzewidywalność polityki pieniężnej,
- cena uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> – z uwagi na nieprzewidywalność rozwoju systemu EU ETS i unijnej polityki klimatycznej,
- sprawność instalacji wychwytu CO<sub>2</sub> – z uwagi na niepewności technologiczne.

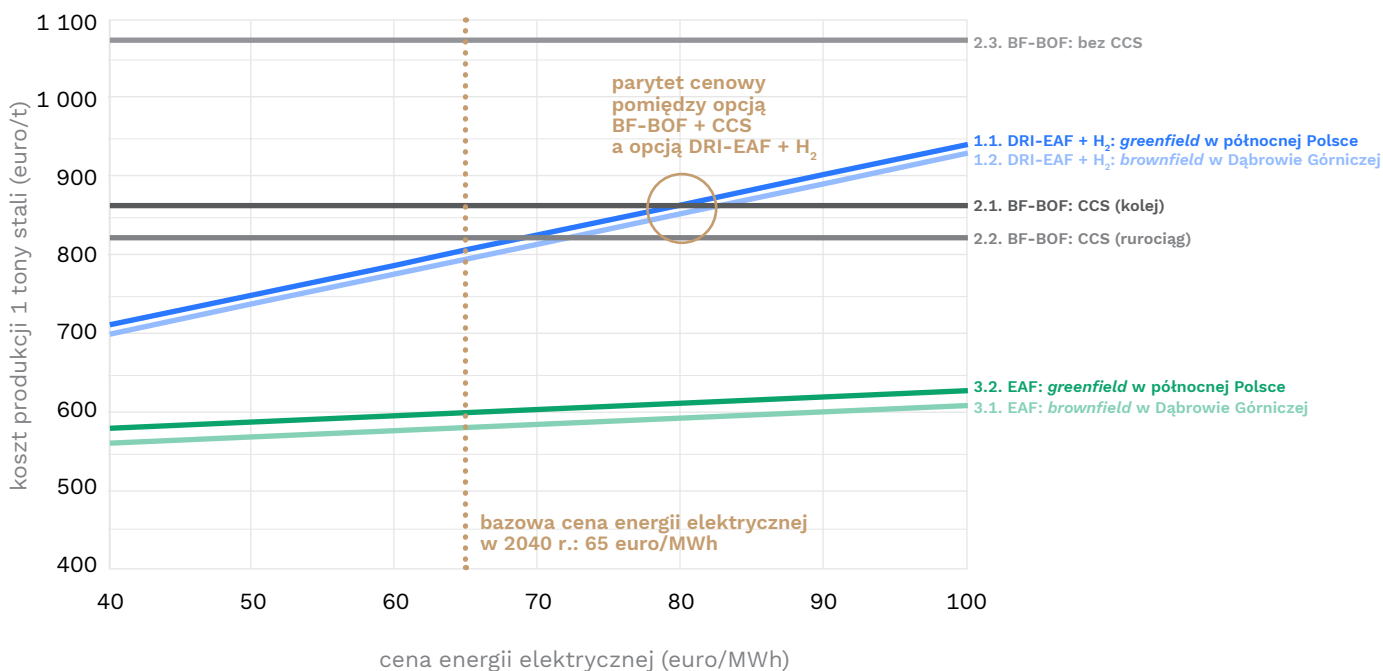
#### 3.3.1. Cena zakupu energii elektrycznej

Na cenę zakupu energii elektrycznej szczególnie wrażliwy jest scenariusz z hutą DRI-EAF + H<sub>2</sub> wykorzystującą wodór, niezależnie od jej lokalizacji. Przy cenie energii elektrycznej zmieniającej się od 40 do 100 euro/MWh, koszt produkcji stali rośnie od 700 do 950 euro/t (por. dwie niebieskie linie na wykresie 7). Od kosztów energii elektrycznej, głównie z uwagi na ich wpływ na cenę wodoru, uzależnione jest bowiem (przy bazowej cenie zakupu w kalkulatorze wynoszącej 65 EUR/MWh) aż ponad 30% całego kosztu produkcji stali w tym scenariuszu. Im tańszy prąd, tym bardziej konkurencyjna wobec innych technologii jest technologia DRI-EAF + H<sub>2</sub>.

**Cena prądu powinna mieć też wpływ na konkurencyjność scenariusza BF-BOF + CCS z uwagi na energochłonność instalacji wychwytu CO<sub>2</sub>.** Ze względu na ograniczenia naszego modelu nie pokazujemy jednak tej zależności analogicznie do opcji DRI-EAF + H<sub>2</sub>. W opcji technologicznej BF-BOF + CCS koszt energii elektrycznej uwzględniony jest jednak w zaczerpniętym z zewnętrznego źródła (CATF, 2022) ogólnym koszcie usługi CCS i nie podlega zmianom wraz ze zmianą ceny zakupu energii elektrycznej w modelu.

Zmiana ceny zakupu energii elektrycznej nie wpływa znacząco na koszt produkcji stali w technologii EAF. Pomimo, że produkcja stali w tej technologii opiera się na energii elektrycznej, to jej koszt przy bazowych wartościach w naszym kalkulatorze stanowi zaledwie ok. 9% wszystkich kosztów produkcji. Wobec tego zmiana kosztu produkcji stali elektrycznej w założonym przedziale cen elektryczności nie przekracza 100 euro/t stali (por. dwie zielone linie na wykresie 7).

**WYKRES 7. Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych cenach zakupu energii elektrycznej (euro/MWh)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

Zmiana ceny zakupu energii elektrycznej o 10 euro/MWh wpływa na zmianę kosztu produkcji stali w opcji technologicznej DRI-EAF + H<sub>2</sub> o 38 euro/t stali, a w opcji technologicznej EAF zaledwie o 8 euro/t stali.

### 3.3.2. Stopa procentowa

Koszt kapitału i stopa oprocentowania finansowania dłużnego mają szczególny wpływ na koszt produkcji stali w hutach DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz EAF. Wynika to głównie z faktu, że w odpowiednich scenariuszach konieczne będą nakłady kapitałowe na nowe aktywa trwałe, w przeciwieństwie do scenariuszy BF-BOF, które będą bazować na już istniejących mocach wytwórczych i technologiach podlegających odtwarzaniu (zakładamy 5% kosztów zmiennych jako coroczne nakłady odtworzeniowe).

Oprocentowanie kapitału powinno mieć również wpływ na scenariusz BF-BOF + CCS (2.1. oraz 2.2.) wymagający sfinansowania infrastruktury CCS. Ze względu na ograniczenia naszego modelu koszty CAPEX tej infrastruktury są ujęte w koszcie usługi CCS dostarczanej przez zewnętrznego operatora i nie podlegają zmianom wraz ze zmianą stopy procentowej.

**Wpływ zmiany stopy procentowej nie jest równomierny dla scenariusza DRI-EAF + H<sub>2</sub> oraz EAF.** Zmiana kosztu produkcji stali w danym przedziale wartości dla stopy procentowej (od 2% do 12%) wynosi ok. 100 euro/t stali dla stali elektrycznej (scenariusze 3.1. oraz 3.2.) i nawet 150 euro/t stali w przypadku stali wodorowej (scenariusze 1.1. oraz 1.2.). Huta DRI-EAF + H<sub>2</sub> wymaga bowiem większych nakładów finansowych, zwłaszcza w scenariuszu *greenfield*.

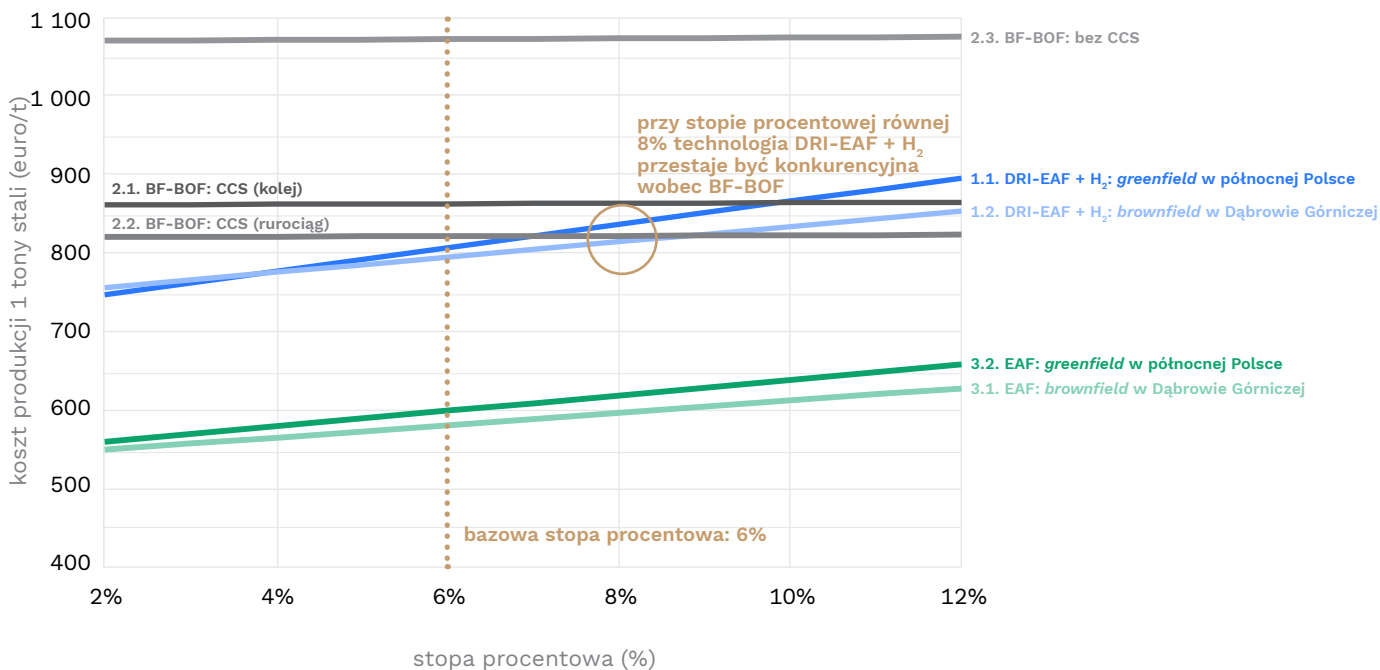
**Wskazujemy na bliski parytet cenowy obu opcji produkowania nisko- i zeroemisyjnej stali pierwotnej (DRI-EAF + H<sub>2</sub> versus BF-BOF + CCS) dla stopy procentowej na poziomie 8%.** Stymulacja inwestycji w hutę zielonej stali wymagałaby więc niższej stopy procentowej, ale nie tylko w wyniku zmiany polityki pieniężnej. Oprocentowanie w wysokości 8% jest w momencie publikacji tego opracowania (październik 2024 r.) standardowe dla polskiej gospodarki, jednak wynika z przeciwdziałania rosnącej wcześniej inflacji. Nasze bazowe założenie o stopie procentowej na poziomie 6% opiera się na oczekiwanym spadku stóp procentowych w kolejnych latach. Decyzja o inwestycji w nową hutę (ang. *final investment decision*) zapadłaby po kolejnych szczegółowych analizach dopiero po kilku latach od dzisiaj<sup>15</sup>.

Przy takim oprocentowaniu (6%) budowa huty DRI-EAF + H<sub>2</sub> już jest najbardziej konkurencyjną opcją dekarbonizacji polskiej produkcji stali pierwotnej w naszym modelu, a może być jeszcze bardziej opłacalnym rozwiązaniem w przypadku otrzymania preferencyjnego oprocentowanego i innego wsparcia ze strony państwa i krajowych instytucji rozwoju, w tym Polskiego Funduszu Rozwoju i Banku Gospodarstwa Krajowego (ramka 2).



<sup>15</sup> Przyjmujemy również założenie o rozpatrywaniu tej inwestycji w kontekście konkurencji na europejskim rynku stali ze strony globalnych producentów cieszących się niższą efektywną stopą procentową dzięki dostępowi do finansowania z globalnych rynków kapitałowych.

## WYKRES 8. Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych wartościach stopy procentowej (%)



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

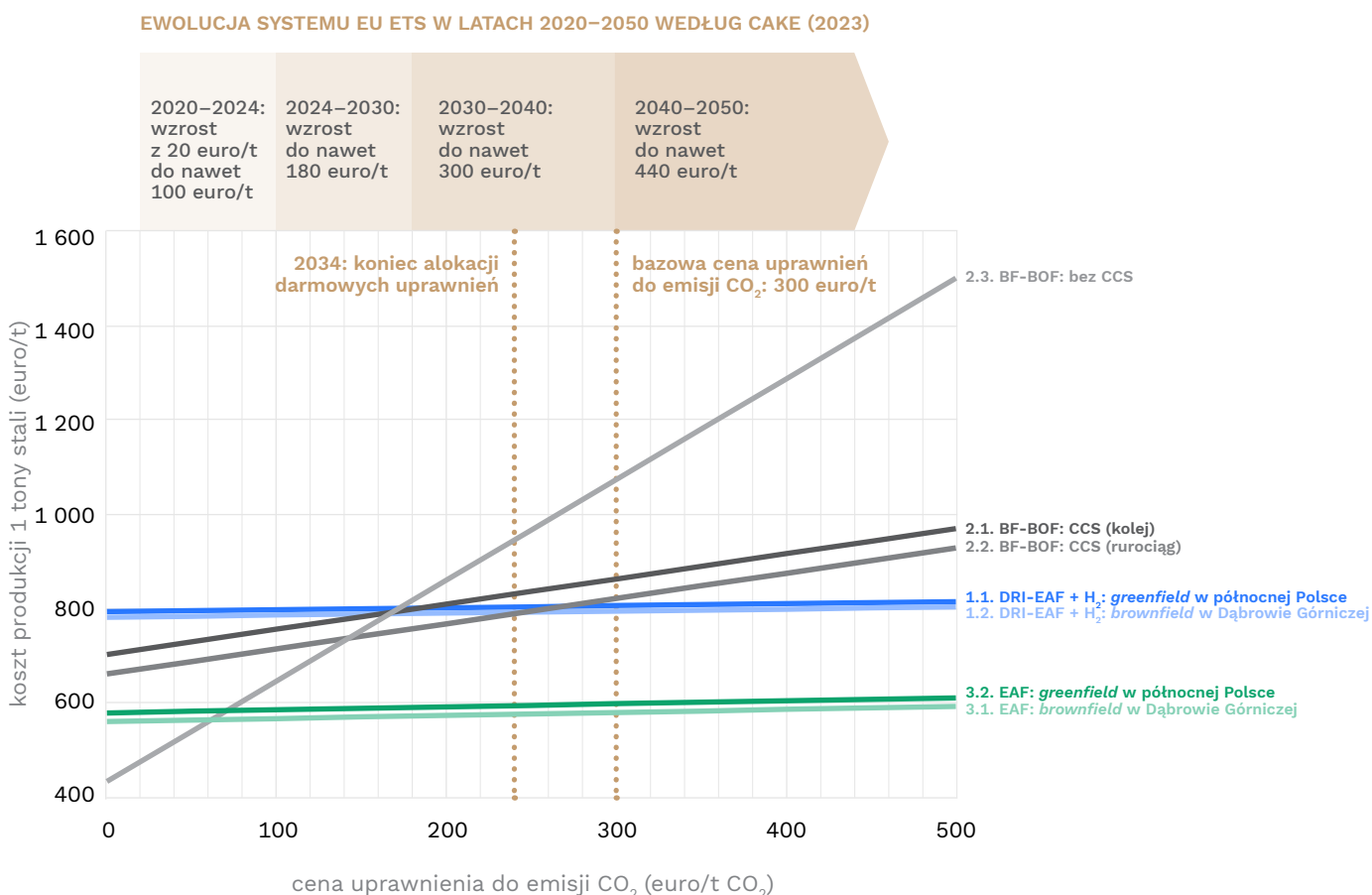
Wzrost stopy procentowej o 2 p.p. wpływa na wzrost kosztu produkcji stali w opcji technologicznej DRI-EAF + H<sub>2</sub> o 30 euro/t dla scenariusza *greenfield* i 20 euro/t stali dla scenariusza *brownfield*. W przypadku opcji technologicznej EAF zmiana ta wynosi 20 euro/t stali dla scenariusza *greenfield* i 16 euro/t stali dla scenariusza *brownfield*.

### 3.3.3. Cena uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>

W przypadku radykalnego wzrostu kosztu uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, tj. nawet do poziomu 500 euro/t, utrzymanie obecnej metody produkcji stali pierwotnej oznaczałoby skrajną niekonkurencyjność. Koszt produkcji stali w scenariuszu BF-BOF bez CCS (2.3.) wzrósłby wówczas do 1 500 euro/t stali i byłby o ponad 500 euro/t stali wyższy od najdroższego scenariusza niskoemisyjnego (2.1. BF-BOF + CCS [kolej]), oraz dwa razy wyższy niż w scenariuszach DRI-EAF + H<sub>2</sub>. Wzrost ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> do kwoty blisko 500 euro nie jest wcale nieprawdopodobny. Scenariusze rozwoju rynku EU ETS autorstwa KOBiZE prognozują wzrost cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> do poziomu 440 euro/t CO<sub>2</sub> w 2050 r. (CAKE, 2023).

Utrzymywanie produkcji stali pierwotnej w Polsce w niezmienionej formule oznaczałoby więc coraz droższą stal. Rozwiązaniem są technologie nisko- i prawie zeroemisyjne, które są mniej wrażliwe na zmiany ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, pomimo niewielkich emisji CO<sub>2</sub> także z tych procesów.

## WYKRES 9. Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych wartościach ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> (euro/t)



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

Zmiana ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> o 50 euro/t CO<sub>2</sub> wpływa na zmianę kosztu produkcji stali w opcji technologicznej DRI-EAF + H<sub>2</sub> o 2 euro/t stali. W przypadku scenariuszy BF-BOF + CCS zmiana ta wynosi 27 euro/t stali, a dla scenariusza BF-BOF bez CCS aż 107 euro/t stali. W scenariuszach EAF koszt stali zmienia się o 3 euro/t stali.

### 3.3.4. Sprawność wychwytu CO<sub>2</sub>

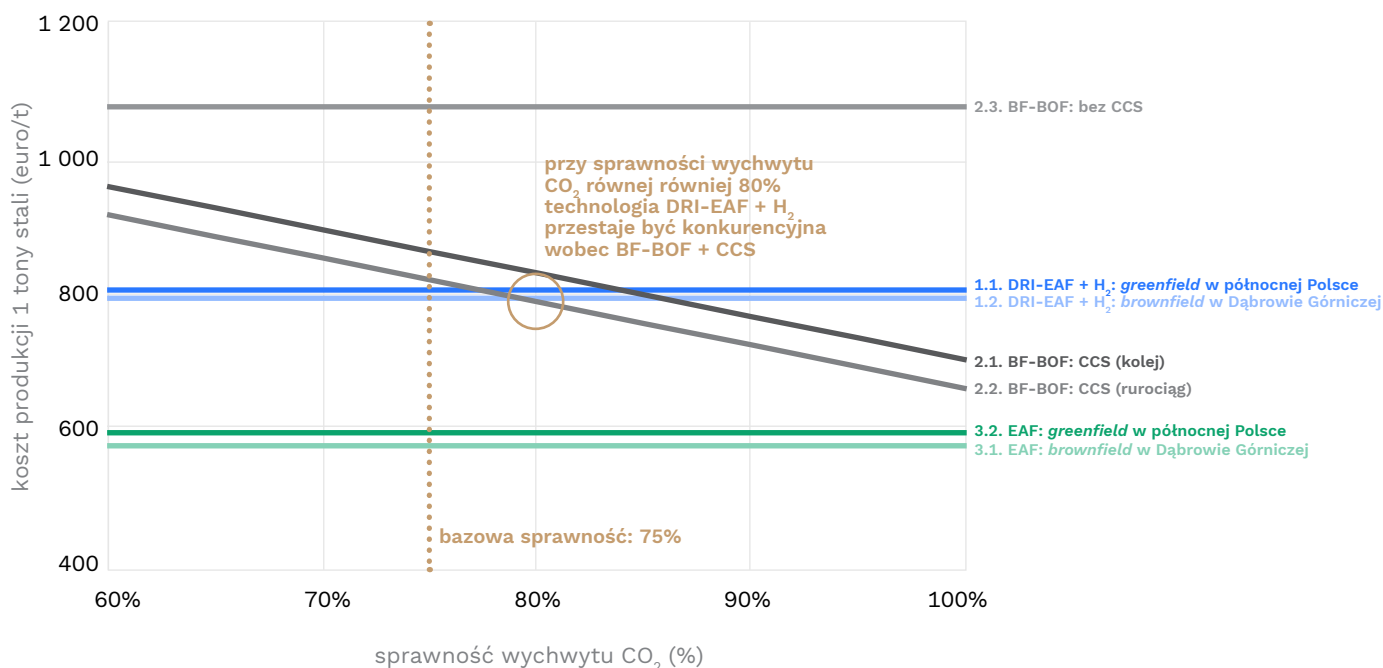
Sprawność wychwytu CO<sub>2</sub> na poziomie powyżej 90% pozwoliłaby scenariuszom BF-BOF + CCS wyprzedzić pod względem konkurencyjności kosztów scenariusze DRI-EAF + H<sub>2</sub>. Większa sprawność wychwytu CO<sub>2</sub> oznacza bowiem, że trzeba zakupić mniej uprawnień do jego emisji. Zwiększenie sprawności z wartości bazowej na poziomie 75% założonej w modelu na podstawie literatury (CATF, 2022), może jednak nie być wykonalne.

Absorpcja aminowa sama w sobie cechuje się sprawnością wychwytu o wartości nawet ponad 90% (Karayil i in., 2024) lecz nie dla wszystkich drobnych punktów emisji CO<sub>2</sub> w hucie optymalne byłoby zakładanie instalacji wychwytu CO<sub>2</sub>. Nawet jeżeli byłoby to wykonalne technicznie, to wiązałoby się z dodatkowymi nakładami kapitałowymi, nieproporcjonalnymi do uzyskanych korzyści, co z kolei przełożyłoby się na wzrost kosztu usługi CCS.

**Scenariusze BF-BOF + CCS są na granicy konkurencyjności ze scenariuszami DRI-EAF + H<sub>2</sub> już przy bazowych założeniach kosztu usługi CCS w kalkulatorze.** Wzrost tego kosztu powyżej bazowych 110 i 130 euro/t CO<sub>2</sub> (w zależności od środka transportu CO<sub>2</sub> – odpowiednio gazociąg i kolej) wpłynęłyby negatywnie na konkurencyjność tej technologii. Efekt ten mógłby być ograniczony niskim kosztem energii elektrycznej i niskim oprocentowaniem na budowę koniecznej infrastruktury, ale wówczas potaniałaby również produkcja stali w scenariuszach DRI-EAF + CCS (1.1. oraz 1.2.). Nie przewidujemy także radykalnego spadku nakładów inwestycyjnych wymaganych przy budowie infrastruktury CCS.

W świetle takich założeń i wspólnych zależności obu technologii od kosztu energii elektrycznej i kosztu kapitału (stopy procentowej) stal z huty BF-BOF + CCS pozostaje prawdopodobnie na przegranej pozycji wobec technologii DRI-EAF + H<sub>2</sub>. Produkcja stali w obecnym układzie BF-BOF okazałaby się najbardziej konkurencyjna cenowo w mało prawdopodobnym scenariuszu niskich cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> lub bardzo wysokich kosztów pozyskania wodoru.

**WYKRES 10. Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnej sprawności instalacji wychwytu CO<sub>2</sub> (%)**



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie *Kalkulatora kosztów produkcji stali*.

Zmiana sprawności wychwytu CO<sub>2</sub> o 5 p.p. wpływa na zmianę kosztu produkcji stali w scenariuszach BF-BOF + CCS o 32 euro/t stali.

## 4. Rekomendacje i wnioski dla decydentów

**Polska gospodarka potrzebuje dostaw nisko – lub zeroemisyjnej stali pierwotnej, aby utrzymać nie tylko konkurencyjność cenową, ale też odpowiednio niski ślad węglowy produktów stalowych.** Najwyższej jakości stal pierwotna wciąż będzie też nieodzowna w konstrukcjach i produktach stalowych narażonych na czynniki atmosferyczne. Dlatego sektor prywatny i rząd muszą wspólnie podjąć decyzję co do obranej ścieżki lub ścieżek dekarbonizacji na podstawie przedstawionych w tej analizie opcji technologicznych. Mimo liberalizacji i prywatyzacji sektora hutnictwa, rząd musi aktywnie zaangażować się i przejąć rolę kształtującego strategiczne kierunki jego rozwoju.

Na podstawie przeprowadzonej analizy trendów na światowym i europejskim rynku stali oraz modelowania kosztów produkcji tego surowca w różnych opcjach technologicznych formułujemy następujące wnioski dla decydentów:



### Nie powinniśmy spowalniać transformacji hutnictwa stali

Wprost przeciwnie – decyzje o inwestycji w głęboką dekarbonizację należy podjąć już teraz, na długo zanim wzrosną efektywne koszty uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> i rozpoczną się konieczne inwestycje. Rząd powinien wesprzeć sektor prywatny w podjęciu decyzji o inwestycji w dekarbonizację hutnictwa w co najmniej jednej z przedstawionych w naszym raporcie opcji technologicznych. Aktywna polityka przemysłowa powinna zachęcać do podejmowania ryzyka i inwestycji w czyste technologie, nawet jeśli dynamiczny wzrost cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> w systemie EU ETS spodziewany jest dopiero w latach 30., co pozwala odwlec rozpoczęcie odpowiednich inwestycji co najmniej o kilka lat. Już dziś mamy wystarczające dowody na to, że utrzymanie obecnej produkcji stali pierwotnej w hucie ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej w obecnym kształcie (bez instalacji CCS) jest niemożliwe w długim terminie.



### Konieczne jest wsparcie regulacyjne i finansowe oraz inwestycje w infrastrukturę towarzyszącą hutnictwu nisko- lub zeroemisyjnemu

Rozwój usługi CCS lub gospodarki wodorowej będzie kluczowy dla zabezpieczenia dostaw nisko – lub zeroemisyjnej stali dla Polski. Obecnie sektory te są na bardzo wczesnym stadium rozwoju, co wymaga zwiększonej aktywności państwa – nie tylko w tworzeniu regulacji, ale też rozwoju dedykowanej

infrastruktury do przesyłu i magazynowania odpowiednio wodoru (DRI-EAF + H<sub>2</sub>) i CO<sub>2</sub> (BF-BOF + CCS). Wsparcie finansowe w postaci bezzwrotnych dotacji lub nisko oprocentowanych pożyczek i gwarancji może być niewystarczające do mitygacji ryzyka dla inwestorów. Bazując na doświadczeniach niemieckiego sektora stalowego, możliwym instrumentem wsparcia będą węglowe kontrakty różnicowe (ang. *carbon contracts for difference* – CCfD).



### Potrzebujemy niskich cen energii elektrycznej dla przemysłu

Będą one kluczowe dla opłacalności wszystkich scenariuszy dekarbonizacyjnych (poza scenariuszem importu). Każda z przedstawionych tutaj technologii dekarbonizacji produkcji stali oznacza większą konsumpcję energii elektrycznej (zarówno w ujęciu całościowym, jak i jednostkowym) niż dzisiejsza produkcja stali pierwotnej w Dąbrowie Górniczej. Cena zdekarbonizowanej stali będzie więc w bardzo dużym stopniu zależna od cen energii elektrycznej. Państwo ma wpływ na spadek efektywnych cen zakupu energii elektrycznej poprzez zwiększanie udziału OZE w miksie energetycznym i kształtowanie stawek opłat przesyłowych. Pożądane byłyby także punktowe rozwiązania w postaci rabatów dla odbiorców energii elektrycznej zlokalizowanych w strefach przyspieszonego rozwoju OZE, np. na północy Polski.



### Pomoc dla regionów i pracowników potencjalnie poszkodowanych w wyniku dekarbonizacji

Przemysł stalowy powinien być bardziej obecny w działaniach na rzecz sprawiedliwej transformacji. W obecnej perspektywie budżetowej UE na lata 2021–2027 przemysł energochłonny i regiony przemysłowej w Polsce nie są beneficjentami środków Funduszu Sprawiedliwej Transformacji. Działania na rzecz dywersyfikacji ekonomicznej i mitygowania kosztów społecznych w polskich regionach węglowych, w szczególności na Śląsku, należy rozszerzyć o sektor stalowy, który podlega obecnie istotnym turbulencjom. Możliwa relokacja produkcji stali z południa na północ Polski (dzięki dostępowi do dużych wolumenów zielonej energii) może wymagać wsparcia regionów i pracowników sektora zlokalizowanych w obecnych miejscach.

**Polska stoi obecnie przed historycznym wyzwaniem transformacji sektora hutniczego i jego potencjalnej restrukturyzacji.** Prawdopodobnie ostatni raz takie wyzwanie miał przed sobą rząd Jerzego Buzka na przełomie XX i XXI w., czego efektem był *Program restrukturyzacji hutnictwa żelaza i stali* z 2001 r. (Sejm RP, 2001). Liczymy na to, że niniejszym raportem przyczyniamy się do zrozumienia wśród decydentów dylematów strategicznych i wyboru co najmniej jednej z przedstawionych opcji technologicznych dotyczących przede wszystkim produkcji stali pierwotnej. W przypadku braku decyzji Polsce grozi ograniczenie się do roli producenta stali jedynie w technologii przetapiania złomu (EAF) oraz dalszego wzrostu importu.



# Objaśnienia i skróty

<b>BF-BOF</b>	Wielki piec i konwertor tlenowy (ang. <i>Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace</i> )
<b>CAKE</b>	Centrum Analiz Klimatyczno-Energetycznych
<b>CAPEX</b>	Koszty inwestycyjne (kapitałowe)
<b>CATF</b>	Clean Air Task Force
<b>CBAM</b>	Mechanizm dostosowywania cen na granicach Unii Europejskiej z uwzględnieniem emisji CO <sub>2</sub> (ang. <i>Carbon Border Adjustment Mechanism</i> )
<b>CCfD</b>	Węglowy kontrakt różnicowy (ang. <i>Carbon Contract for Difference</i> )
<b>CCUS</b>	Wychwytywanie, transport, wykorzystanie i magazynowanie dwutlenku węgla (ang. <i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i> )
<b>DRI</b>	Bezpośrednia redukcja żelaza (ang. <i>Direct Reduction of Iron</i> )
<b>EAFF</b>	Elektryczny piec łukowy (ang. <i>Electric Arc Furnace</i> )
<b>ELS</b>	Elektrolizer
<b>E-PRTR</b>	Europejski Rejestr Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń (ang. <i>European Pollutant Release and Transfer Register</i> )
<b>EU ETS</b>	Unijny system handlu uprawnieniami do emisji CO <sub>2</sub> (ang. <i>EU Emission Trading Scheme</i> )
<b>HBI</b>	Żelazo gąbczaste, produkt bezpośredniej redukcji rudy żelaza w formie zimnej (ang. <i>hot-briquetted iron</i> )
<b>IPCEI</b>	Ważne projekty stanowiące przedmiot wspólnego europejskiego zainteresowania (ang. <i>Important Projects of Common European Interest</i> )
<b>IRENA</b>	Międzynarodowa Agencja Energii Odnawialnej (ang. <i>International Renewable Energy Agency</i> )
<b>KOBIZE</b>	Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami
<b>OPEX</b>	Koszty operacyjne
<b>PPA</b>	Umowa zakupu energii elektrycznej (ang. <i>Power Purchase Agreement</i> )

# Wykaz obiektów

<b>Wykres 1.</b> Produkcja stali surowej w technologii wielkiego pieca i konwertora tlenowego (BF-BOF) oraz łuku elektrycznego (EAF) w Polsce w latach 2012-2023 na tle szacowanego krajowego zużycia gotowych produktów stalowych (mln ton)	10
<b>Ramka 1.</b> Kluczowi gracze w branży produkcji stali w Polsce	11
<b>Wykres 2.</b> Projekcje cen uprawnień do emisji CO <sub>2</sub> do 2030 r. według sześciu największych ośrodków analitycznych w UE (euro'2023/tona CO <sub>2</sub> )	13
<b>Ramka 2.</b> Huty zielonej stali w Niemczech	14
<b>Schemat 1.</b> Uproszczony proces technologiczny produkcji nisko- lub zeroemisyjnej stali w hucie opartej o bezpośrednią redukcję żelaza (DRI-EAF + H <sub>2</sub> ), w wielkim piecu i konwertorze tlenowym z wychwytem CO <sub>2</sub> (BF-BOF + CCS) oraz w elektrycznym piecu łukowym (EAF)	16
<b>Tabela 1.</b> Projekty budowy hut DRI realizowane w Europie	19
<b>Ramka 3.</b> Technologia wychwytu CO <sub>2</sub> w Cementowni Kujawy – projekt Kujawy Go4ECOPlanet.	22
<b>Tabela 2.</b> Przegląd opcji technologicznych i scenariuszy dekarbonizacji	26
<b>Tabela 3.</b> Kluczowe założenia kosztowe i techniczne do modelu kosztów produkcji stali	28
<b>Wykres 3.</b> Struktura kosztów produkcji stali w różnych opcjach technologicznych (euro/t stali)	33
<b>Wykres 4.</b> Struktura kosztów zmiennych produkcji stali w różnych opcjach technologicznych (euro/t stali)	35
<b>Wykres 5.</b> Zużycie energii elektrycznej oraz moc zainstalowana instalacji wykorzystywanych przy produkcji stali w scenariuszach nisko- i prawie zeroemisyjnych	37
<b>Wykres 6.</b> Emisyjność CO <sub>2</sub> produkcji stali w różnych opcjach technologicznych, w przeliczeniu na 1 tonę wyprodukowanej stali (t CO <sub>2</sub> /t stali)	39
<b>Wykres 7.</b> Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych cenach zakupu energii elektrycznej (euro/MWh)	41
<b>Wykres 8.</b> Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych wartościach stopy procentowej (%)	43
<b>Wykres 9.</b> Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnych wartościach ceny uprawnień do emisji CO <sub>2</sub> (euro/t)	44
<b>Wykres 10.</b> Koszt produkcji 1 tony stali w ujęciu jednostkowym (euro/t) przy różnej sprawności instalacji wychwytu CO <sub>2</sub> (%)	45

# Bibliografia

- Agora Industry, Future Camp, Wuppertal Institut. (2022). *Carbon Contracts for the transformation of industry: Calculator for the assessment of transformation costs for low-CO<sub>2</sub> primary steel production*. Model version 1.1, Berlin, 16.12.22 <https://www.agora-industry.org/data-tools/steel-transformation-cost-calculator>.
- ArcelorMittal Warszawa. (2024). *Raport Zrównoważonego Rozwoju ArcelorMittal Warszawa 2023*. <https://www.arcelormittal-warszawa.com/wp-content/uploads/2024/03/ArcelorMittal-Warszawa-Raport-zrownowazonego-rozwoju-2023.pdf>.
- ArcelorMittal. (2024a). *ArcelorMittal starts the construction of an electric arc furnace at its Gijón plant*. <https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-starts-the-construction-of-an-electric-arc-furnace-at-its-gijon-plant#>.
- ArcelorMittal. (2024b). *World-first trial of new technology to recycle CO<sub>2</sub> emissions from steel production begins at ArcelorMittal Gent, Belgium*, <https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/world-first-trial-of-new-technology-to-recycle-co2-emissions-from-steel-production-begins-at-arcelormittal-gent-belgium>.
- Ariadne. (2023). *MSR through 2030: impact on market liquidity and considerations for the 2026 reform. Input material and takeaways from a workshop in Brussels*. [https://ariadneprojekt.de/media/2023/12/Ariadne-Documentation\\_ETSWorkshopBruessele\\_December2023.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2023/12/Ariadne-Documentation_ETSWorkshopBruessele_December2023.pdf).
- Bankier.pl. (2024). *Dyrektor w Ministerstwie Przemysłu: Są aktywne hutnicze w kraju do zagospodarowania*. <https://www.bankier.pl/wiadomosc/Dyrektor-w-Ministerstwie-Przemyslu-Sa-aktywne-hutnicze-w-kraju-do-zagospodarowania-8743254.html>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024). *Klimaschutzverträge*. <https://www.klimaschutzvertraege.info/startseite>.
- BMBF. (2023). *Update der Nationalen Wasserstoffstrategie: Turbo für die H<sub>2</sub>-Wirtschaft*. [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energie-wende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energie-wende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html).
- Bukowski, M., Bocian, K. (2024). *Przemysł stalowy w Polsce. Analiza sektora, wyzwania, wizja przyszłości*. WiseEuropa.
- Clean Task Air Force. (2022). *The cost of carbon capture and storage in Europe*. <https://www.catf.us/ccs-cost-tool/>
- Euronews. (2024). *German steel company Thyssenkrupp may rethink plans for green steel*. <https://www.euronews.com/business/2024/10/07/german-steel-company-thyssenkrupp-may-rethink-plans-for-green-steel>.
- European Environment Agency. (2023). *Trends and projections in the EU ETS in 2023. The EU Emissions Trading System in numbers*. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cm-report-2023-07-1>.
- Eurostat. (2024). *National accounts aggregates by industry*. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/0bfc1499-459e-400e-b885-012d14c5e206?lang=en>.
- Facchini, F., Mossa, G., Mummolo, G., Vitti, M. (2021). *An Economic Model to Assess Profitable Scenarios of EAF-Based Steelmaking Plants under Uncertain Conditions*. *Energies* 2021, 14, 7395. <https://doi.org/10.3390/en14217395>.

- Fundacja InStrat. (2024). Emisje przemysłowe w Polsce (baza danych). <https://energy.instrat.pl/emisje/baza-emisji-przemyslowych/>.
- GMK Center. (2023). *MENA region can become a leader in the production of DRI and green steel*. <https://gmk.center/en/news/mena-region-can-become-a-leader-in-the-production-of-dri-and-green-steel/>.
- Główny Urząd Statystyczny. (2024). *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2023 roku (i wcześniejsze)*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/przemysl-budownictwo-srodki-trwale/przemysl/produkcja-wyrobow-przemyslowych-w-2023-roku,3,21.html>.
- Hermwille, L. i in. *A climate club to decarbonize the global steel industry*. *Nat. Clim. Chang.* 12, 494–496 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01383-9>.
- Holcim. (2024). *Pierwsza zeroemisyjna cementownia*. <https://www.go4ecoplanet.com/o-projekcie>.
- Hüttelm, A., Lehner, J. (2024). *Revisiting Investment Costs for Green Steel: Capital Expenditures, Firm Level Impacts, and Policy Implications*. DIW Berlin Discussion Papers 2082. [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.901042.de/publikationen/diskussionspapiere/2024\\_2082/revisiting\\_investment\\_costs\\_for\\_green\\_steel\\_capital\\_expenditures\\_firm\\_level\\_impacts\\_and\\_policy\\_implications.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.901042.de/publikationen/diskussionspapiere/2024_2082/revisiting_investment_costs_for_green_steel_capital_expenditures_firm_level_impacts_and_policy_implications.html).
- IEA. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023#overview>.
- IEEFA. (2023). *MENA poised to become a leading green iron and steel hub*. <https://ieefa.org/articles/mena-poised-become-leading-green-iron-and-steel-hub>.
- IRENA. (2022). *Green hydrogen for industry: A guide to policy making*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA\\_Green\\_Hydrogen\\_Industry\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022.pdf).
- Karayil, A., Elseragy, A., Aliyu, A.M. (2024). *An Assessment of CO<sub>2</sub> Capture Technologies towards Global Carbon Net Neutrality*. *Energies* 2024, 17, 1460. <https://doi.org/10.3390/en17061460>.
- Kapczyńska, K. (2024). *Huty: produkcja wróciła do poziomu z lat 50. ubiegłego wieku*. *Puls Biznesu*. <https://www.pb.pl/huty-produkcja-wrocila-do-poziomu-z-lat-50-ubieglego-wieku-1206450>.
- Keßler, L., Lovisolo, M. (2023). *Hydrogen DRI for steel in a Resource-Constrained Europe: How Much Renewable Electricity is Needed to Decarbonise the Sector with Green Hydrogen?* <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2023/07/HYDROGEN-DRI-FOR-STEEL-IN-A-RESOURCE-CONSTRAINED-EUROOPE-V3-1-2-1.pdf>.
- Komisja Europejska. (2022). *HYBRIT Demonstration: Swedish largescale steel value chain demonstration of Hydrogen Breakthrough Iron-making Technology*. [https://climate.ec.europa.eu/document/download/6361be48-c451-4e46-b64d-c8a5d069bc8b\\_en?filename=if\\_pf\\_2022\\_hybrit\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/document/download/6361be48-c451-4e46-b64d-c8a5d069bc8b_en?filename=if_pf_2022_hybrit_en.pdf).
- Komisja Europejska. (2024). *Projects selected for grant preparation*. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls/projects-selected-grant-preparation\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls/projects-selected-grant-preparation_en).
- Komisja Europejska. (2024). *What is the Innovation Fund?* [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en).
- Kopeć, J., Kulbacki, M., Stefaniak, S., Hetmański M. (2023). *Konteksty dekarbonizacji przemysłów energochłonnych*. InStrat Policy Paper 05/2023. <https://instrat.pl/konteksty-dekarbonizacji-przemyslow-energochlonych/>.
- Korolec, M. (2024). *Europe Needs an Industrial Development Fund*. <https://www.project-syndicate.org/commentary/euroopean-union-must-develop-green-industrial-strategy-by-marcin-korolec-2024-06>.

- Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (2023). *Raport z rynku CO<sub>2</sub>*. Nr 141. [https://kobize.pl/uploads/materialy/materialy\\_do\\_pobrania/raport\\_co2/2023/KOBiZE\\_Analiza\\_ryнку\\_CO2\\_grudzie%C5%84\\_2023.pdf](https://kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/raport_co2/2023/KOBiZE_Analiza_ryнку_CO2_grudzie%C5%84_2023.pdf).
- Kubiczek, P., Smoleń, M., Żelisko, W. (2023). *Polska prawie bezemisyjna. Cztery scenariusze transformacji energetycznej do 2040 r.* In: *Strat Policy Paper 06/2023*. <https://in strat.pl/polska-2040/>.
- Hetmański, M., Laskowski, K., Kulbacki, M., Swoczyna, B. (2024). *Kalkulator kosztów produkcji stali w Polsce*. Fundacja In: *Strat*. [www.link.in strat.pl/stal-nisko-czy-zeroemisyjna-kalkulator](http://www.link.in strat.pl/stal-nisko-czy-zeroemisyjna-kalkulator).
- Laskowski, K. (2023). *CCS konieczny i bezpieczny. Czym są technologie wychwytu i podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz jak mogą pomóc powstrzymać zmianę klimatu*. WISEuropa. <https://wise-euroopa.eu/2023/12/08/technologie-ccs-nieodlaczonym-elementem-ograniczania-emisji-dwutlenku-węgla/>.
- Mamoń, M. (2024). *Załoga upadłej huty Liberty Częstochowa dostanie niższe pensje. Ten scenariusz już kiedyś zrealizowano: najpierw dzierżawa, potem sprzedaż*. Wyborcza.pl. <https://czestochowa.wyborcza.pl/czestochowa/7,48725,31190394,zaloga-upadlej-huty-liberty-czestochowa-dostanie-nizsze-wynagrodzenia-najnowszy.html>.
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2023b). *Projekt LOTOS Green H<sub>2</sub> zatwierdzony przez Komisję Europejską*. <https://www.gov.pl/web/klimat/projekt-lotos-green-h2-zatwierdzony-przez-komisje-europejska>.
- Myszor, P. (2024a). *Czas zimnych pieców. Takiego tąpnięcia w hutnictwie nie było od dekady*. <https://www.wnp.pl/hutnictwo/czas-zimnych-piecow-takiego-tapniecia-w-hutnictwie-nie-bylo-od-dekady,793678.html>.
- Myszor, P. (2024b). *Ważą się losy Huty w Ostrowcu. Bliskowschodni koncern może być blisko przejęcia*. <https://www.wnp.pl/hutnictwo/waza-sie-losy-huty-w-ostrowcu-bliskowschodni-koncern-moze-byc-blisko-przejecia,872689.html>.
- National Petroleum Council. (2021). *Meeting the Dual Challenge – A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage – Chapter 2*. [https://dualchallenge.npc.org/files/CCUS-Chap\\_2-030521.pdf](https://dualchallenge.npc.org/files/CCUS-Chap_2-030521.pdf).
- Nicholas, S., Basirat, S. (2024). *Carbon capture for steel?* Institute for Energy Economics and Financial Analysis. <https://ieefa.org/resources/carbon-capture-steel>.
- Orlen. (2022). *Strategia wodorowa Grupy ORLEN do 2030 roku*. <https://www.orlen.pl/content/dam/internet/orlen/pl/pl/zrownowazony-rozwoj/strategia-wodorowa/Strategia-Wodorowa-Grupy-ORLEN.pdf>.
- Orlen. (2023). *Polityka klimatyczna Grupy Orlen*. <https://www.orlen.pl/pl/zrownowazony-rozwoj/odpowiedzialnosc-za-klimat/Polityka-klimatyczna-Grupy-ORLEN>.
- 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>.
- Polenergia. (2024). *Fabryka zielonego wodoru na Górnym Śląsku z dofinansowaniem do 142,77 mln euro. To projekt H2Silesia, rozwijany przez Polenergię*. <https://www.polenergia.pl/fabryka-zielonego-wodoru-na-gornym-slasku-z-dofinansowaniem-do-14277-mln-euro/>.
- Pyrka, M. i in. (2023). *Nowe sektory w EU ETS w kontekście neutralności klimatycznej UE w 2050 – skutki dla Polski*. <https://climatecake.ios.edu.pl/download/117/>.
- Rada Ministrów RP. (2001). *Program restrukturyzacji hutnictwa żelaza i stali. Aktualizacja 2001*. [https://orka.sejm.gov.pl/RejestrD.nsf/wgdruk/3071/\\$file/3071nr5.pdf](https://orka.sejm.gov.pl/RejestrD.nsf/wgdruk/3071/$file/3071nr5.pdf).
- Reuters. (2023). *Germany targets \$2.1 billion in funding for Thyssenkrupp green steel plant*. <https://www.reuters.com/markets/europe/german-econ-ministry-plans-2-blm-euroo-funding-thyssenkrupp-2023-06-05/>.

- Salzgitter AG. (2023). *Salzgitter AG receives official notice of government funding for the SALCOS® low-CO2 steel production program*. <https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/salzgitter-ag-receives-official-notice-of-government-funding-for-the-salcosr-low-co2-steel-production-program-20702.html>.
- Salzgitter AG. (2024). *Green Industrial Hydrogen*. <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/grinhy-20.html>.
- Sasiain, A., Rechberger, K., Spanlang, A. i in. (2020). *Green Hydrogen as Decarbonization Element for the Steel Industry*. *Berg Huettenmaenn Monatsh* 165, 232–236 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00501-020-00968-1>.
- Schreck, S., Kobiela, G., Wolf, S. (2023). *Climate-neutral steel. Enabling industrial transformation in Germany*. Germanwatch Policy Paper. [https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch\\_climate-neutral\\_steel\\_2023.pdf](https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_climate-neutral_steel_2023.pdf).
- Thyssenkrupp. (2023). *Robert Habeck, Germany's Minister for Economic Affairs and Climate Action visits thyssenkrupp: thyssenkrupp Steel to receive federal and state government funding totaling around two billion euros*. <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/robert-habeck-germany's-minister-for-economic-affairs-and-climate-action-visits-thyssenkrupp:-thyssenkrupp-steel-to-receive-federal-and-state-government-funding-totaling-around-two-billion-euros-229072>.
- Trollip, H., McCall, B., Bataille, C. (2022). *How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization*. *Climate Policy*, 22(2), 236–247. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>.
- Węglkokoks. (2022). *Węglkokoks buduje*. <https://weglkokoks.com.pl/dla-mediow/weglkokoks-buduje/>.
- Witecka, W. i in. (2023). *15 Insights on the Global Steel Transformation*. Agora Industry/Wuppertal Institut. [https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021-06\\_IND\\_INT\\_Global-Steel/A-EW\\_298\\_GlobalSteel\\_Insights\\_WEB.pdf](https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_Global-Steel/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB.pdf).
- wnp. pl. (2024). *Niemiecki gigant może mieć problemy z „zieloną” produkcją stali. Na szali 2 mld euro*. <https://www.wnp.pl/hutnictwo/nemiecki-gigant-moze-miec-problemy-z-zielona-produkcja-stali-na-szali-2-mld-euro,881461.html>.
- World Steel Association. (2024). *World steel in figures*. <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/>.
- World Steel Association. (2023). *Carbon capture and storage (CCS)*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Carbon-capture-use-and-storage-2023.pdf>.

