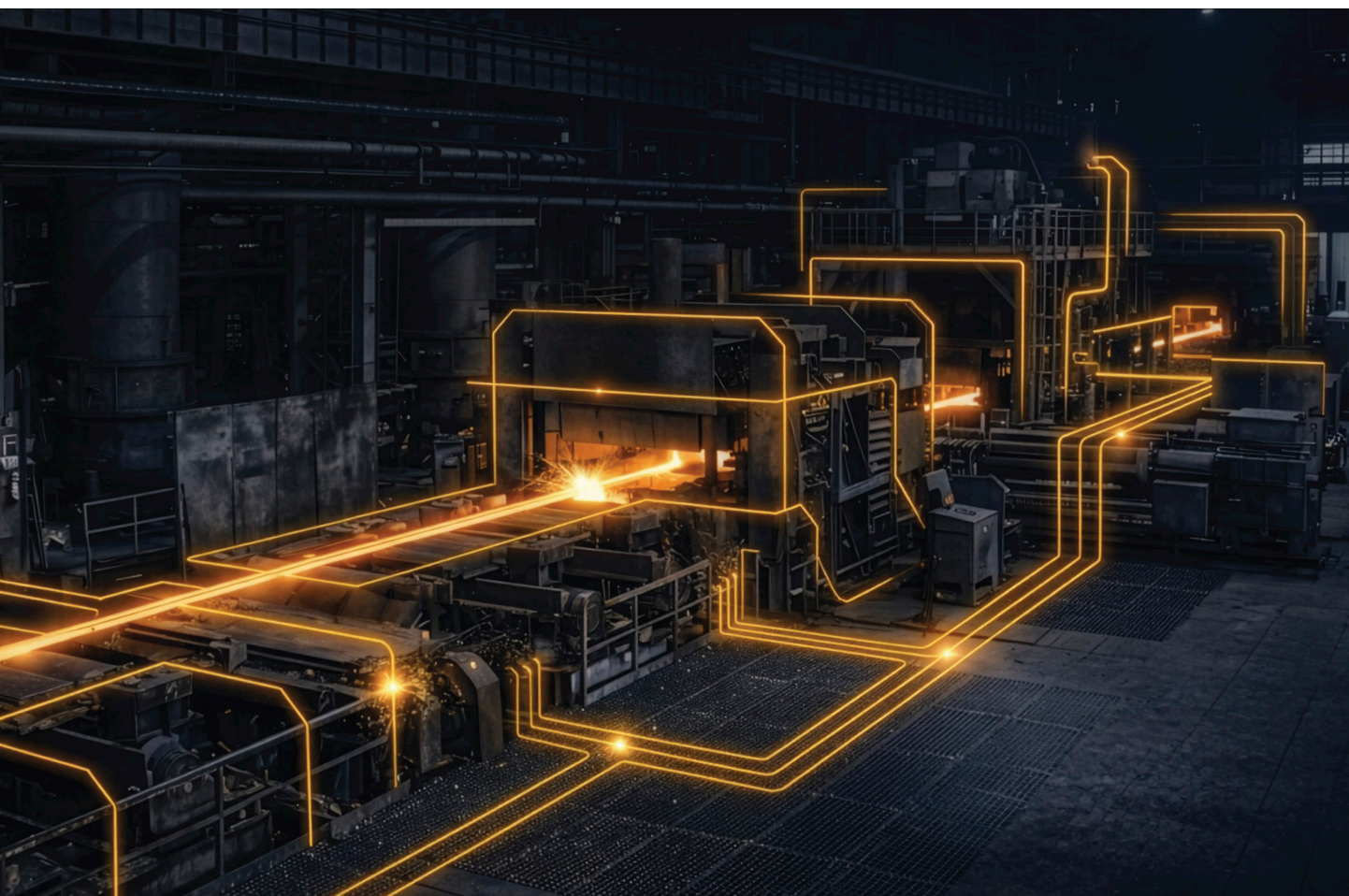




Forum
Energii

Analizy i dialog



Modernizacja albo marginalizacja

Jak elektryfikacja przemysłu może zapewnić Polsce

bezpieczeństwo, konkurencyjność i wzrost gospodarczy?

Forum Energii to interdyscyplinarny think tank z Polski działający w obszarze energii. Nasz zespół tworzą ekspertki i eksperci łączący doświadczenia zdobyte m.in. w administracji publicznej, biznesie, nauce i mediach.

Misją Forum Energii jest inicjowanie dialogu na temat zmian polityki publicznej z kluczowymi interesariuszami, proponowanie rozwiązań opartych na wiedzy, a także inspirowanie do działania na rzecz sprawiedliwej i efektywnej transformacji energetycznej, która prowadzi do neutralności klimatycznej.

Analizujemy sytuację Polski, ale także europejskie powiązania i światowe kierunki zmian w energetyce oraz ich konsekwencje dla Polski. Nasze cele realizujemy poprzez publikacje, obejmujące raporty, analizy i opinie, a także organizację eksperckich sesji i debat. W ten sposób tworzymy przestrzeń do pogłębionej, merytorycznej dyskusji nad najbardziej złożonymi wyzwaniami transformacji energetycznej kluczowych obszarów gospodarki.

W obliczu narastającej dezinformacji, przykładamy szczególną wagę do rzetelności informacji i jakości przekazywanych danych. Wszystkie analizy Forum Energii mogą być powielane pod warunkiem wskazania ich źródła i autorów.

AUTORSTWO

Marcin Dusiło – Forum Energii

Aleksandra Rogożyńska – Forum Energii

dr Sonia Buchholtz – Forum Energii

W przygotowaniu analizy rynkowej producentów urządzeń wsparto się narzędziami generatywnej sztucznej inteligencji. Wszystkie dane zostały zweryfikowane przez autorów raportu.

WSPÓŁPRACA

Filip Żebrowski – Forum Energii

Inez Brogowska

REDAKCJA

Julia Zaleska

KOREKTA

Małgorzata Kowalska

OPRACOWANIE GRAFICZNE

Karol Koszniec

ZDJĘCIA

Obraz wygenerowany przy użyciu sztucznej inteligencji.

DATA PUBLIKACJI

luty 2026

Wstęp	
1. Główne wnioski	3
2. Cel i zakres raportu	4
3. Kontekst	5
4. Elektryfikacja jako sposób na modernizację przemysłu	10
5. Krajobraz energetyczny polskiego przemysłu	14
5.1. Które branże i w jakim celu zużywają ciepło?	14
5.2. Ile ciepła można zelektryfikować w poszczególnych branżach?	18
6. Wpływ elektryfikacji przemysłu na system elektroenergetyczny	20
7. Koszty elektryfikacji przemysłu	22
8. Rola biomasy i odpadów w procesach przemysłowych	25
9. Technologie	26
9.1. Pompy ciepła	27
9.2. Kotły elektryczne	32
9.3. Ogrzewanie oporowe	33
9.4. Ogrzewanie indukcyjne	36
9.5. Elektryczne piece łukowe	38
9.6. Ogrzewanie podczerwienią	40
9.7. Ogrzewanie dielektryczne	41
9.8. Podsumowanie wybranych technologii	44
10. Gospodarcze znaczenie elektryfikacji przemysłu w Unii Europejskiej i rola danych w kształtowaniu tego procesu	45
Załącznik 1. Schemat klasyfikacji gałęzi przemysłu według Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD)	52
Załącznik 2. Lista procesów w przetwórstwie przemysłowym wykorzystujących ciepło	53
Załącznik 3. Parametry i charakterystyka technologii ogrzewania elektrycznego w przemyśle	55
Bibliografia	57

Wstęp

Elektryfikacja to szansa na odejście od paliw kopalnych w polskim i europejskim przemyśle. Jeśli ten proces się powiedzie, spadnie zależność od importu paliw, wzrośnie bezpieczeństwo energetyczne, a firmy staną się bardziej odporne na wahania cen surowców. Elektryfikacja może także pomóc zwiększyć konkurencyjność europejskich i polskich przedsiębiorstw – zwłaszcza w łańcuchach dostaw, w których coraz częściej bierze się pod uwagę ślad węglowy.

Aby jednak wykorzystać ten potencjał, rozwiązania w zakresie elektryfikacji muszą być dostępne technologicznie i ekonomicznie. W tym raporcie pokazujemy, że brak technologii nie jest barierą. Dla większości procesów przemysłowych dostępne są już rozwiązania, które skutecznie zastępują ciepło wytwarzane ze spalania paliw kopalnych. Wyzwaniem pozostają koszty inwestycji i eksploatacji oraz konieczność dostosowania infrastruktury energetycznej do nowej roli – systemu, który musi dostarczać coraz więcej energii elektrycznej, optymalnie pochodzącej ze źródeł odnawialnych.

Elektryfikacja przemysłu to nie tylko zmiana technologiczna, lecz także strategiczna decyzja o kierunku rozwoju gospodarczego. Od niej zależy, czy Polska będzie w stanie utrzymać konkurencyjność swoich sektorów przemysłowych w globalnym wyścigu technologicznym. To również test spójności polityki przemysłowej i energetycznej kraju – bo transformacja nie powiedzie się bez współpracy biznesu, administracji i sektora finansowego.

W tle pojawia się też pytanie o przyszłość europejskiej produkcji urządzeń i komponentów niezbędnych do elektryfikacji przemysłu. Unia Europejska ma w tym obszarze duże doświadczenie i kompetencje, potrzebna jest jednak także aktywna polityka przemysłowa. Zbyt wolne tempo inwestycji może sprawić, że rynek zdominują dostawcy spoza Europy, co osłabi strategiczną niezależność i bezpieczeństwo technologiczne wspólnoty.

Tym raportem chcemy przesunąć punkt ciężkości publicznej dyskusji – z pytania o to, czy elektryfikować przemysł, na pytanie o to, jak robić to mądrze i skutecznie. Pokazujemy, że elektryfikacja jest możliwa, jeśli towarzyszą jej odpowiednie mechanizmy wsparcia, dostęp do finansowania oraz stabilne otoczenie regulacyjne. Jednocześnie podkreślamy, że proces ten powinien być opłacalny i trwały w warunkach rynkowych. Wierzymy, że nasza analiza i rekomendacje staną się impulsem do działania dla decydentów, przedsiębiorstw i instytucji, które wspólnie mogą przyspieszyć elektryfikację polskiego przemysłu.

Zachęcam do lektury i dyskusji.

dr Joanna Pandera

Prezeska Forum Energii

1. Główne wnioski

- Przemysł stanowi fundament polskiej gospodarki, wytwarzając ok. 23% wartości dodanej oraz zatrudniając ponad 3 mln osób. Sektor rokrocznie emituje ok. 90 mln ton CO_{2e} oraz odpowiada za zużycie 1/4 energii w Polsce. Energia ta pochodzi głównie z gazu ziemnego (połowa polskiego zużycia), węgla koksowego (98% polskiego zużycia) oraz ropy i jej pochodnych (18% krajowego zużycia).
- Elektryfikacja przemysłu to jedno z najważniejszych rozwiązań prowadzących do zmniejszenia zapotrzebowania na import paliw, a co za tym idzie – wzrostu bezpieczeństwa energetycznego, oraz redukcji emisji. Ogranicza także ekspozycję firm na zmienność cen paliw.
- Dzięki dostępnym technologiom można obecnie w pełni zelektryfikować produkcję ciepła w 17 z 24 branż przetwórstwa przemysłowego. Oznacza to ich niemal pełną dekarbonizację za pomocą elektryfikacji bezpośredniej.
- Po wykluczeniu produkcji wodoru (ze względu na odrębną ścieżkę dekarbonizacji) oraz sektora energetycznego (rafinerie, koksownie) zelektryfikować można 61% ciepła w przetwórstwie przemysłowym. Oznacza to redukcję zużycia gazu na produkcję ciepła o 62%, węgla energetycznego o 42%, a ropy i jej pochodnych o 83%. Elektryfikacja ciepła pozwoli rocznie zaoszczędzić ok. 3 mld m³ gazu ziemnego, ok. 2 mln ton węgla kamiennego energetycznego oraz ok. 8 PJ ropy i produktów ropopochodnych. Wynikająca z tego redukcja emisji gazów cieplarnianych wynosi ok. 21 mln ton CO₂.
- Elektryfikacja pozwoli oszczędzić ok. 1/3 energii pierwotnej potrzebnej do wytworzenia ciepła w przemyśle przetwórczym, jednak podwoi zużycie energii elektrycznej przez cały sektor. Krajowy System Elektroenergetyczny (KSE) powinien być przygotowany na dostarczenie szacunkowo dodatkowych ok. 57 TWh energii i średnio 9,6 GW mocy.
- Główną technologią w tym procesie są przemysłowe pompy ciepła, które odpowiadają za 48% możliwej elektryfikacji. Różne technologie ogrzewania bezpośredniego, takie jak piece indukcyjne, ogrzewanie oporowe czy dielektryczne, mogą zelektryfikować kolejne 37% ciepła.
- Rozpiętość szacowanych nakładów inwestycyjnych na technologie elektryfikacyjne jest duża, jednak w każdym wariantcie rachunku koszty te są porównywalne ze środkami inwestowanymi co roku przez przemysł w maszyny, urządzenia i narzędzia.
- Główną barierą dla elektryfikacji polskiego przemysłu jest wysoki koszt energii elektrycznej. Jest ona 2,5–2,6 razy wyższa niż koszt wykorzystania gazu ziemnego. Jednocześnie przemysł ma trudności z uzyskaniem warunków przyłączenia oraz budowaniem własnych źródeł energii, które ten koszt mogłyby obniżyć.
- Elektryfikacja unijnego przemysłu powinna opierać się na urządzeniach produkowanych przez europejskich producentów lub wytwarzanych na terenie Europy. Dotychczas przewaga Europy w tym segmencie dóbr wynikała z zaawansowanej wiedzy, rozwiniętej bazy produkcyjnej oraz niższych kosztów bieżącej obsługi. Obecnie jednak sytuacja na rynku europejskim pogarsza się z uwagi na rosnącą konkurencję ze strony Chin, gdzie szybkie tempo elektryfikacji gospodarki napędza wzrost krajowej produkcji. Ryzyko dla rozwoju europejskich mocy produkcyjnych stanowi jednak dostęp do rzadkich surowców, materiałów i półproduktów.
- W Europie działają czołowi producenci w każdej z 10 analizowanych technologii specjalizujących się w rozwiązaniach „szytych na miarę”. Mimo koncentracji ośrodków badawczo-rozwojowych (B+R) w regionie europejskie firmy coraz częściej rozwijają produkcję na rynkach zewnętrznych. Kluczem do zachowania przewagi konkurencyjnej są ochrona wypracowanego know-how oraz dalsze innowacje.

2. Cel i zakres raportu

Elektryfikacja przemysłu w Unii Europejskiej postrzegana jest jako sposób na równoczesne rozwiązanie wyzwań, jakimi są:

1. Zmniejszenie zależności od importu paliw, a zatem jednocześnie zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego kraju oraz jego mniejszą ekspozycję na ryzyko fluktuacji cen paliw na globalnych rynkach.
2. Rozwój potencjalnie dochodowej niszy gospodarczej w obszarze cleantech¹ oraz wzmocnienie konkurencyjności Europy w tej sferze.
3. Dekarbonizacja zgodnie z celami net zero, tj. osiągnięcie do 2050 r. równowagi między emisjami gazów cieplarnianych a ich pochłanianiem, tak aby globalnie nie zwiększać ilości gazów cieplarnianych w atmosferze.

Choć elektryfikacja większości procesów przemysłowych jest technologicznie możliwa, to na drodze do realizacji tych celów stoją bariery, takie jak potencjalnie wysokie koszty zmian czy ograniczone moce produkcyjne rodzimych producentów.

Głównym celem tego raportu jest określenie potencjału redukcji zapotrzebowania na paliwa kopalne w polskim przetwórstwie przemysłowym poprzez elektryfikację, a także kosztów takiej zmiany i jej wpływu na Krajowy System Elektroenergetyczny.

4

W tym celu w analizie określono:

1. Potencjał redukcji zużycia energii, paliw oraz emisji gazów cieplarnianych poprzez elektryfikację ciepła w przetwórstwie przemysłowym dzięki zastąpieniu paliw spalanych w celu ogrzewania, chłodzenia czy uzyskania ciepła procesowego **energią elektryczną wykorzystywaną bezpośrednio**. Założeniem jest wykorzystanie tylko tych technologii elektryfikacyjnych, które są dziś komercyjnie dostępne i tylko w tych procesach produkcyjnych, w których można je obecnie zastosować.
2. Koszt technologiczny elektryfikacji polskiego przetwórstwa przemysłowego oraz wpływ elektryfikacji na wzrost zużycia energii elektrycznej w Polsce.
3. Stopień, w jakim elektryfikacja przemysłu może się odbyć przy wykorzystaniu europejskiej produkcji i z udziałem europejskich producentów, a także perspektywy europejskich wytwórców na przyszłość.

¹ Za słownikiem Cambridge: cleantech (ang. *clean technology*) – technologia, która umożliwia ograniczenie lub uniknięcie szkód dla środowiska (źródło: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/cleantech>). Za branżowym stowarzyszeniem Cleantech for Europe: Koncepcja cleantech obejmuje szeroki zakres produktów, usług i procesów w różnych sektorach przemysłu, które z założenia mają na celu: zapewnienie lepszej wydajności przy niższych kosztach, znaczne ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie negatywnego wpływu na środowisko, poprawę efektywnego i odpowiedzialnego wykorzystania zasobów naturalnych (źródło: <https://www.cleantechforeurope.com/explainers/what-is-cleantech>).

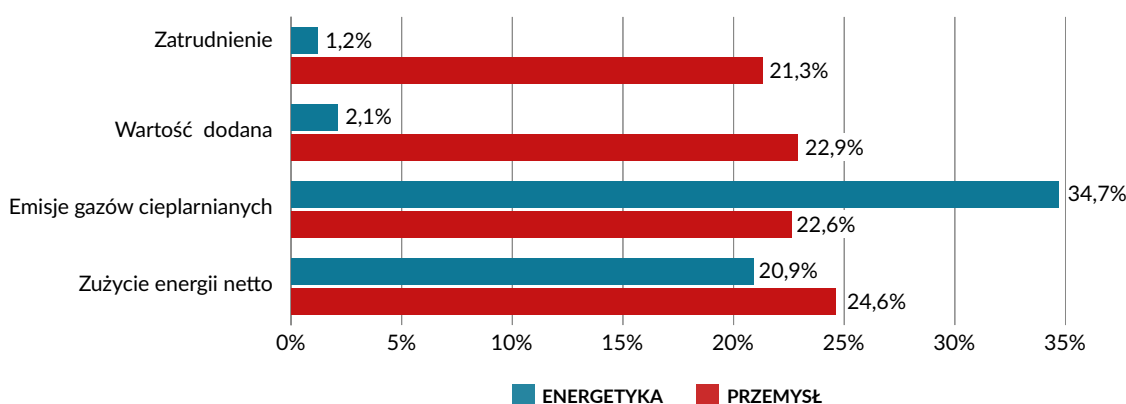
3. Kontekst

Dyskusja na temat transformacji energetycznej w Polsce, Unii Europejskiej i na świecie koncentrowała się głównie na elektroenergetyce i ciepłownictwie. Wraz z postępem dekarbonizacji konieczne stało się szersze spojrzenie na to wyzwanie. Naturalnych kolejnych kroków należy poszukać w danych. IPCC² wskazuje, że w skali świata przemysł jest odpowiedzialny za największą część emisji gazów cieplarnianych (24% w porównaniu z 23% pochodzącymi z sektora energetycznego)³. W Polsce przemysł wprawdzie ustępuje w tej kwestii miejsca elektroenergetyce, jednak wciąż odpowiada za 23% krajowych emisji.

Dla Polski transformacja ma jednak nie tylko wymiar klimatyczny – co najmniej tak samo istotny jest aspekt zużycia energii, od importu której dynamicznie się uzależniamy⁴. Minimalizacja zużycia paliw kopalnych w przemyśle jest zatem czynnikiem krytycznym dla powodzenia transformacji energetycznej i zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Przemysł różni się jednak od elektroenergetyki nie tylko ilościowo, lecz również jakościowo. Energia elektryczna i ciepła woda zużywane w kraju muszą bowiem zostać (w zdecydowanej większości) wyprodukowane w Polsce, podczas gdy produkcja krzesel, kęsów stalowych czy nawozów może zostać przeniesiona do dowolnego miejsca na świecie. Relokacja produkcji byłaby jednak ciosem dla polskiej gospodarki, w której przemysł (z wyłączeniem energetyki) odpowiada za zatrudnienie 21,3% pracujących (3,1 mln osób), wypracowuje 22,9% wartości dodanej i odgrywa strategiczną rolę dla bezpieczeństwa żywnościowego i militarnego kraju.

Wykres 1. Porównanie energetyki (sekcja D) oraz przemysłu (sekcje B, C, E) pod względem zatrudnienia, udziału w PKB, emisji gazów cieplarnianych oraz zużycia energii



5

Źródło: opracowanie własne Forum Energii na podstawie danych Eurostatu.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

Przyszłość polskiego oraz europejskiego przemysłu jest niepewna. Często powtarzana teza o „ucieczce” przemysłu z UE, choć celnie identyfikuje zagrożenie, błędnie wskazuje transformację energetyczną jako przyczynę. Logikę tę odwraca raport Draghiego⁵, który dowodzi, że to brak transformacji i wynikające z niej zależności surowcowe, w połączeniu z szokiem cenowym na rynku paliw kopalnych, podważyły fundamenty europejskiej konkurencyjności. Czyni to z dekarbonizacji zmianę konieczną dla przyszłości przemysłu.

² IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu, główny światowy organ naukowy działający pod auspicjami ONZ. Zajmuje się oceną ryzyka związanego ze zmianami klimatu, proponuje sposoby jego mitygacji oraz adaptacji do nowych warunków na podstawie najbardziej aktualnej wiedzy naukowej.

³ M. Pathak et al., *Technical Summary. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2022, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/technical-summary/>.

⁴ Więcej o rosnącym uzależnieniu od importu energii: K. Kwizdiński, M. Dusito, *Transformacja energetyczna Polski. Edycja 2025*, Forum Energii, 2025, <https://www.forum-energii.eu/transformatcja-energetyczna-polski-edycja-2025>.

⁵ Raport Mario Draghiego, byłego premiera Włoch i byłego prezesa Europejskiego Banku Centralnego, napisany na zlecenie Komisji Europejskiej, stanowi diagnozę przyczyn powolnej utraty konkurencyjności produkcji przemysłowej UE na rynkach międzynarodowych oraz proponuje kierunki działań dla unijnej gospodarki w odpowiedzi na globalne wyzwania. Raport dostępny tutaj: https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059.

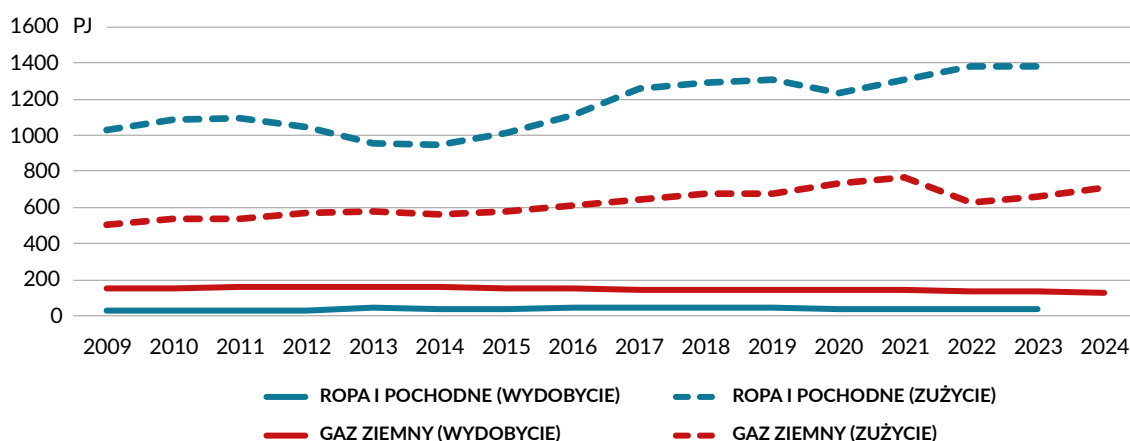
Na zaległości technologiczne i uzależnienie od surowców, których fizycznie nie mamy, nakładają się dodatkowo dynamicznie zmieniające się warunki rynkowe oraz rosnąca presja cenowa, podażowa i jakościowa (rosnąca innowacyjność) produkcji w państwach trzecich. Zwłaszcza w krajowym kontekście odejście od paliw kopalnych to być albo nie być dla przyszłości przemysłu w Polsce.

Polska nie ma surowców mineralnych, których potrzebuje przemysł

Wydobycie gazu ziemnego i ropy naftowej spadają (przy czym były one i tak symboliczne na tle krajowych potrzeb). Jednocześnie zużycie tych surowców od lat rośnie, co powoduje rosnące uzależnienie od ich importu z zewnątrz. Obecnie uzależnienie to wynosi 82% dla gazu ziemnego i 97% dla ropy. Taki stan rzeczy stwarza ryzyko związane z ekspozycją na zmienność cen na światowych rynkach.

Ryzyko to zmaterializowało się już w 2022 r., gdy ze względu na ekstremalnie wysokie ceny gazu ziemnego gazochłonne firmy z sektora chemicznego ograniczyły produkcję, zrywając łańcuchy wartości. Grupa Azoty, największy producent nawozów azotowych w UE, zmniejszyła o 90% produkcję amoniaku będącego podstawą wielkiej syntezy chemicznej (której produktem są nawozy czy niektóre polimery). Powtórka tego scenariusza stanowiłaby ryzyko dla bezpieczeństwa żywnościowego.

Wykres 2. Bilans krajowego wydobycia i zużycia gazu ziemnego oraz ropy naftowej i jej pochodnych*



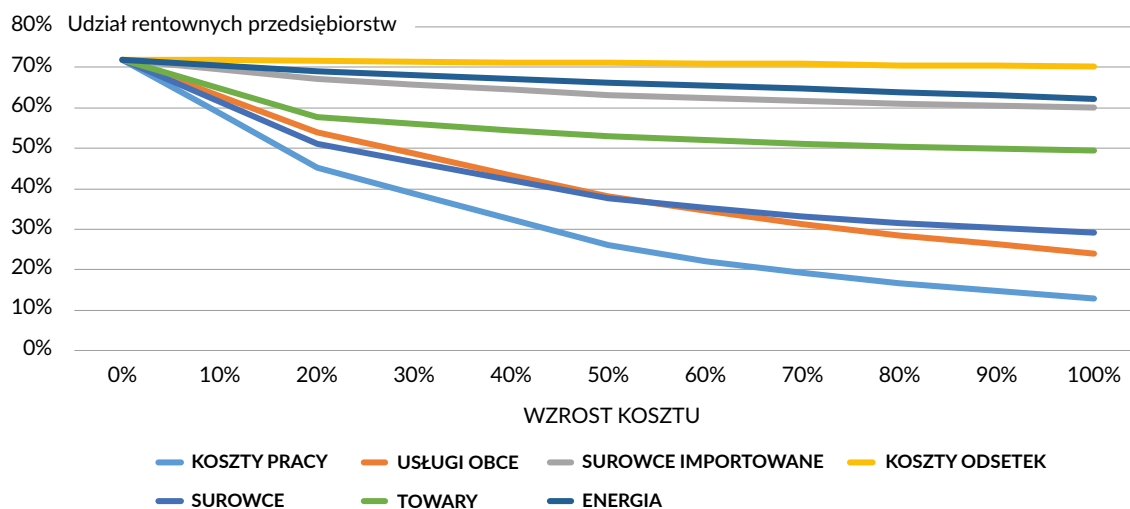
Źródło: dane ENTSOG i Eurostatu.

* Ilości surowców pomiędzy liniami zużycia a wydobycia pochodzą z importu.

Wyczerpuje się obecny model konkurencyjności przemysłu oparty na niskich kosztach produkcji

Największy na to wpływ mają rosnące koszty pracy, wynikające z doganiania przez Polskę średniej unijnej – zarówno pod względem poziomu rozwoju gospodarczego czy jakości życia, jak i zarobków.

Wykres 3. Szacunkowy efekt wzrostu wybranych kosztów (przy innych kosztach niezmiennych) na zyskowność przedsiębiorstwa



Źródło: NBP, *Analiza sytuacji sektora przedsiębiorstw*, „Szybki Monitoring NBP” nr 04/2024, <https://nbp.pl/wp-content/uploads/2024/10/Szybki-Monitoring-NBP-pazdziernik-2024.pdf>.

* Oś pozioma wykresu 3 przedstawia wzrost danego kosztu, oś pionowa – odsetek przedsiębiorstw, które pozostałyby wówczas rentowne. Przykładowo, przy wzroście kosztów pracy o 50% odsetek zyskownych przedsiębiorstw spadałby z dzisiejszych 70% do ok. 25%.

W najtrudniejszej pozycji jest energochłonny przemysł ciężki. Utrzymanie w Polsce tego sektora, operującego na niższych marżach (tj. posiadającego mniejszy bufor na wzrost kosztów), wymaga uwzględnienia w bilansach firm czynnika, który działałby jak przeciwwaga dla producentów pozaeuropejskich mających dostęp do tańszej energii, a także funkcjonujących w warunkach niższych kosztów pracy i niskich wymagań środowiskowych.

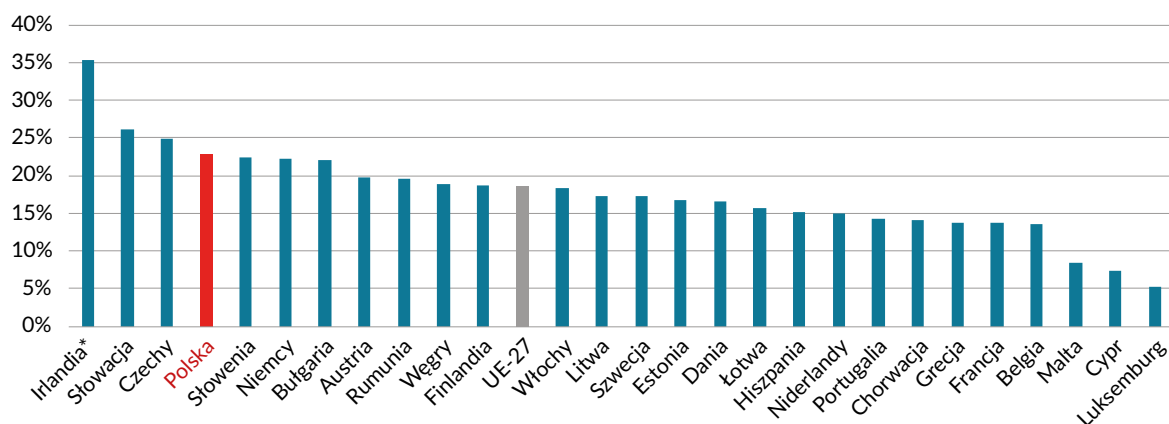
Teoretycznie przeciwwagą mogłaby być pomoc publiczna w postaci bezpośrednich dopłat do produkcji⁶, jednak rozwiązanie to ma poważne wady. W szczególności zaburzałoby konkurencję pomiędzy poszczególnymi państwami członkowskimi UE – najbogatsze i największe państwa mogłyby najhojniej wspierać swoich przedsiębiorców, uniemożliwiając mniej zamożnym krajom konkurowanie z nimi. Brak dodatkowych wymagań przy przyznawaniu pomocy publicznej (np. w postaci redukcji wskaźnika emisji gazów cieplarnianych) dodatkowo ograniczyłby presję odejścia od paliw kopalnych, utrwalając przy tym uzależnienie od ich importu.

Potencjalnie lepszą alternatywą, uzupełniającą już istniejące mechanizmy, jest wykorzystanie obecnej cechy europejskiego przemysłu – niższego śladu węglowego produkcji wynikającego z bardziej zaawansowanych technologii, dbałości o efektywność energetyczną czy zasilania mniej emisyjną energią elektryczną. Temu celowi – konkurowaniu pod względem śladu węglowego zwiększającego konkurencyjność europejskich producentów – ma służyć mechanizm CBAM⁷ (który dla poprawnego działania wymaga jednak jeszcze reformy).

⁶ Bez względu na to, jaką postać miałyby one przybrać – darmowych uprawnień, rekompensat, subsydiów itp.

⁷ CBAM (ang. *Carbon Border Allocation Mechanism*) – mechanizm zwany potocznie cłem węglowym lub granicznym podatkiem węglowym, polegający na uzależnieniu opłaty wwozowej importowanego towaru na teren UE od śladu węglowego jego produkcji. Mechanizm nie wszedł jeszcze w pełni w życie i obejmuje tylko wybrane produkty, przez co jest postrzegany jako narzędzie nieadekwatne do skali wyzwań, z jakimi mierzy się unijny przemysł.

Wykres 4. Udział wartości dodanej przemysłu w PKB w krajach Unii Europejskiej



Źródło: Eurostat.

* Wartość dla Irlandii jest zawyżona ze względu na rejestrację w tym kraju, z przyczyn podatkowych, działalności zagranicznych firm technologicznych.

Pomimo istniejących systemów wsparcia przed polskim przemysłem stoją duże wyzwania związane zwłaszcza z nadchodzącym wycofywaniem darmowych uprawnień do emisji CO₂ oraz utratą konkurencyjności wobec państw, w których koszty wytwarzania dóbr są niższe. Wzmocnienie polskiego przemysłu i uodpornienie go na przyszłe szoki cenowe są konieczne nie tylko dla zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego i militarnego, ale również by zapobiec zapaści gospodarczej i społecznej⁸, która mogłaby przybrać jedną z największych postaci w UE (por. wykres 3).

- 8 Ponadto, również ze względu na aspekt emisyjny, konieczne jest utrzymanie lokalnej produkcji – relokacja fabryk przy jednoczesnym utrzymaniu lub wzroście konsumpcji dóbr może wiązać się ze wzrostem „konsumowanych” emisji gazów cieplarnianych⁹. Przykład takiego zjawiska można już zaobserwować w statystykach emisji dla Rumunii (wykres 5)¹⁰, która zgodnie z typowym podejściem do ich liczenia (tj. emisje CO₂ wygenerowane na terenie kraju) zmniejszyła roczne emisje o ok. 11% w roku 2022 w porównaniu z rokiem 2013, podczas gdy w rzeczywistości (tj. patrząc na emisje CO₂ „zużyte” na terenie kraju) wzrosły one o ok. 13%.

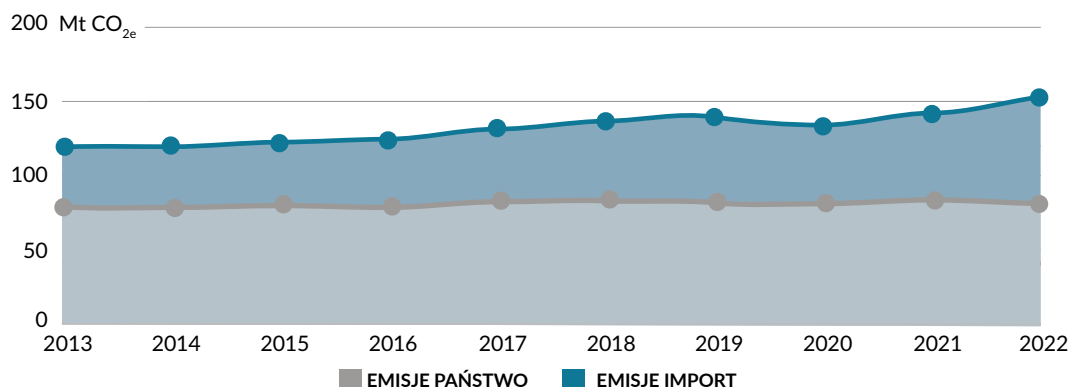
Przyczyną tego zjawiska może być nie tylko konieczność dodatkowego transportu produktów na duże odległości, ale także fakt, że bardziej zaawansowane technologicznie procesy produkcyjne w Europie są efektywniejsze energetycznie. W wyniku tego europejska deindustrializacja z dużym prawdopodobieństwem nie prowadziłaby do globalnego zmniejszenia emisji, a wręcz mogłaby powodować ich wzrost.

8 W stopniu większym niż wskazywałaby liczba osób bezpośrednio zatrudnionych, ponieważ każde bezpośrednie miejsce pracy indukuje zatrudnienie w usługach i przemyśle wspomagających i zaopatrujących to miejsce. Przykładowo, sektor chemiczny zatrudnia w UE 1,2 mln osób i wiąże się z nim kolejne 19 mln miejsc pracy (źródło: Komisja Europejska, *Plan na rzecz wzmocnienia przemysłu chemicznego w UE*, https://commission.europa.eu/news-and-media/news/plan-stronger-eu-chemical-industry-2025-07-08_pl).

9 Zawartych w importowanych oraz produkowanych w kraju dobrach.

10 Postępującą dezindustrializację Rumunii widać na wykresie 5 (w wersji interaktywnej) poprzez spadające emisje eksportowane. Co ważne, spadek ten (o 22% w latach 2013–2022) jest szybszy niż spadek energochłonności przemysłu (o 19%).

Wykres 5. Bilans emisji gazów cieplarnianych „konsumowanych” na przykładzie Rumunii



Źródło: opracowanie własne Forum Energii na podstawie danych JRC (FIGARO).

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

Ograniczenie zużycia paliw kopalnych jest zatem konieczne nie tylko z uwagi na emisje, lecz także ze względu na ryzyko zmienności cen paliw na światowych rynkach oraz zależność od importu energii. Pierwszym krokiem do transformacji przemysłu jest efektywność energetyczna – najtańsza, najbezpieczniejsza i najbardziej przyjazna dla klimatu i portfela energia to ta, której nie trzeba zużyć.

Rola efektywności energetycznej w transformacji przemysłu na przykładzie produkcji cementu

Ze względu na swoje doskonałe właściwości wiążące cement jest kluczowym składnikiem betonu – drugiego najczęściej wykorzystywanego przez ludzkość materiału, zaraz po wodzie¹¹.

Cement składa się z klinkieru cementowego zmielonego z gipsem i innymi dodatkami. Produkcja klinkieru wiąże się ze znacznymi emisjami gazów cieplarnianych, zarówno ze względu na samą chemię reakcji (rozkład materiału wsadowego – węglanu wapnia CaCO_3 do tlenku wapnia CaO , co w sposób nieunikniony generuje CO_2), jak i konieczność dostarczenia do procesu bardzo wysokich temperatur (1350–1450°C).

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy technicznej **nie jest możliwe uniknięcie emisji procesowych** („chemicznych”) **związanych z produkcją cementu**. Jednak emisje związane ze spalaniem paliw w celu uzyskania odpowiednich temperatur można ograniczyć i został już poczyniony duży postęp w tej kwestii.

Obecnie cement produkuje się tzw. metodą suchą, która obniża zużycie energii o 55%¹² względem starszej metody mokrej. Uzyskiwany w tym procesie produkt ma w praktyce takie same właściwości, jednak zarówno zużycie energii (a więc i wiążące się z tym emisje), jak i wody zostały w nim radykalnie obniżone. Kluczowym czynnikiem ograniczającym zużycie energii była zmiana procesu przygotowywania jednorodnej mieszaniny, która ma się zamienić w klinkier:

- w metodzie mokrej surowce były mielone z dodatkiem wody, co zapewniało pełną homogeniczność, jednak później należało tę wodę odparować – woda jest substancją z najwyższą pojemnością cieplną oraz ciepłem parowania i z tego powodu długość pieców obrotowych do wypału klinkieru potrafiła dochodzić do 200 m,
- w metodzie suchej zmielone surowce są mieszane sprężonym powietrzem – jest to trudniejszy technicznie i wymagający większej kontroli proces, jednak ze względu na brak konieczności odparowania wody piece mogą być krótsze (kilkadziesiąt metrów).

Zmiana procesu produkcji pozwoliła dodatkowo lepiej zagospodarować ciepło odpadowe z wysokotemperaturowych spalin, które jest używane do wstępnego ogrzania surowców (do ok. 900°C) przed wejściem do pieca.

¹¹ Colin R. Gagg, *Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis*, „Engineering Failure Analysis” vol. 40, 2014, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630714000387?via%3Dihub>.

¹² GUS, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2022 i 2023, 2024*, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2022-i-2023,4,19.html>.

Analogiczne rozwiązania w innych branżach, zwiększające efektywność energetyczną procesów, stanowią naturalny pierwszy krok w kierunku uniezależnienia przemysłu się od paliw kopalnych poprzez ograniczenie ich zużycia. W wielu przypadkach są one także ekonomicznie opłacalne, czego przykładem jest zmiana metody produkcji cementu.

Efektywność energetyczna ma jednak ograniczenia, ponieważ zużycia energii nie można zmniejszyć do zera. Kolejnym krokiem jest więc zamiana źródła pochodzenia tej energii – z paliw kopalnych na te, które można pozyskiwać w sposób odnawialny i są dostępne w kraju. W polskich warunkach jedynym realistycznym rozwiązaniem na dużą skalę jest niskoemisyjna energia elektryczna¹³. Energię elektryczną można wykorzystać bezpośrednio (np. silnik elektryczny, kocioł elektryczny) lub pośrednio (np. silnik na e-paliwa wyprodukowane przy wykorzystaniu energii elektrycznej, kocioł wodorowy na zielony wodór z elektrolizy wody).

Energia wykorzystana bezpośrednio ma wyższą sprawność niż wykorzystana pośrednio (por. rysunek 1, s. 11), ponieważ każda dodatkowa przemiana energetyczna w łańcuchu obniża sprawność całego procesu, podnosząc zużycie energii elektrycznej. Z tego powodu priorytet powinna mieć elektryfikacja bezpośrednia.

4. Elektryfikacja jako sposób na modernizację przemysłu

Elektryfikacja, rozumiana w tym raporcie jako **zamiana paliw na energię elektryczną**, przyczynia się do dekarbonizacji tylko wówczas, gdy energia elektryczna zasilająca zelektryfikowane procesy pochodzi ze źródeł niskoemisyjnych – obecnie z OZE, w przyszłości również z energetyki jądrowej.

Jedną z największych zalet elektryfikacji jest to, że umożliwia ograniczenie zależności importowych – zamienia bowiem energię pochodzącą głównie z importu (gaz ziemny – 82%, ropa naftowa – 97%) na wytwarzaną w kraju (wiatr, fotowoltaika, przyszłe źródła jądrowe). Uodparnia to krajową gospodarkę na ryzyka związane z wahaniami cen paliw kopalnych na światowych rynkach. Fabryka zasilana w pełni z własnych źródeł odnawialnych nie odczułaby rekordowych wzrostów cen gazu ziemnego czy energii elektrycznej nawet w najostrejszej fazie kryzysu energetycznego, podczas gdy ostatni kryzys energetyczny wywołany wojną Rosji w Ukrainie zmusił część zakładów do wstrzymania produkcji.

Czysta energia elektryczna jest jednak obecnie zasobem rzadkim, o czym świadczy choćby dominująca rola elektrowni węglowych w KSE. Zasób rzadki należy wykorzystywać efektywnie z wielu powodów: od aspektów podażowych (zasób ten jest skończony i wolno przybywa) po aspekty finansowe (przy określonej podaży większy popyt podnosi cenę). W kontekście przemysłowym oznacza to produkcję danego dobra przy możliwie najmniejszym zużyciu energii elektrycznej.

Energia elektryczna może zastąpić zużycie paliw na różne sposoby. Możliwe jest wykorzystanie jej np. w procesie elektrolizy do produkcji wodoru, który następnie zostanie spalony w palniku zamiast obecnie używanego gazu ziemnego. Możliwe jest także dalsze „przetworzenie” tego wodoru do syntetycznego gazu ziemnego, przy wykorzystaniu dodatkowo CO₂¹⁴. Potencjalnych możliwości **pośredniego** wykorzystania energii elektrycznej jest dużo więcej (paliwa syntetyczne, e-metanol itp.). Możliwe jest jednak również wykorzystanie energii elektrycznej **bezpośrednio**, tj. zamiana procesu ogrzewania ze spalania paliw na ogrzewanie indukcyjne, oporowe i inne.

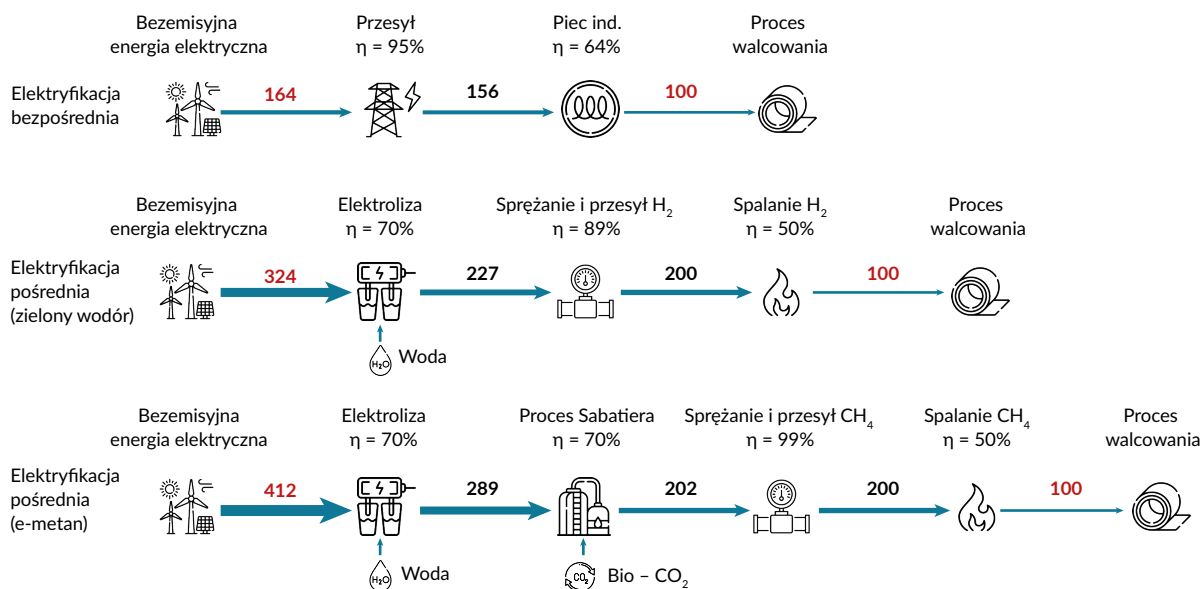
13 Możliwa i łatwiejsza technologicznie jest również zamiana paliwa kopalnego (np. gazu ziemnego) na biometan (w niektórych rozwiązaniach również na biomasę pozyskiwaną w sposób zrównoważony). Będą to jednak najprawdopodobniej rozwiązania niszowe ze względu na ograniczoną podaż oraz bardzo dużą konkurencję (biometan może być wykorzystywany do produkcji ciepła procesowego w przemyśle, bilansowania OZE w sektorze elektroenergetycznym, jak i jako źródło pierwiastkowego węgla w przemyśle chemicznym).

14 Syntetyczny gaz ziemny może być produkowany na różne sposoby, jednym z nich (potencjalnie najczystszy) jest reakcja Sabatiera, w której wodór (H₂) i dwutlenek węgla (CO₂) przekształcane są w wysokiej temperaturze w metan (CH₄) i wodę (H₂O). Produktem tej reakcji jest tzw. e-metanol i jest on bezemisyjny, jeżeli do produkcji wykorzystano bezemisyjnie uzyskane H₂ i biogeniczne CO₂.

Rysunek 1 przedstawia wykorzystanie energii elektrycznej w przemyśle na przykładzie procesu walcowania na gorąco. Temperatura do tego procesu (umowne 100 jednostek energii – j.e.) początkowo pochodzi ze spalania gazu ziemnego. Proces ten można zelektryfikować na trzy sposoby – bezpośrednio (za pomocą pieca indukcyjnego) oraz pośrednio w dwóch wariantach – spalania wodoru albo syntetycznego gazu ziemnego.

Jak wskazano na rysunku, najefektywniejsze jest wykorzystanie energii elektrycznej bezpośrednio – w tym przykładzie do elektryfikacji wymagana jest produkcja 164 j.e. energii elektrycznej, natomiast do elektryfikacji pośredniej (zamiana spalnego dziś gazu ziemnego na zielony wodór lub e-metan) o 98–151% więcej (odpowiednio 324 lub 412 j.e.). Każda dodatkowa przemiana energetyczna w łańcuchu obniża bowiem sprawność całego procesu, podnosząc zużycie energii elektrycznej.

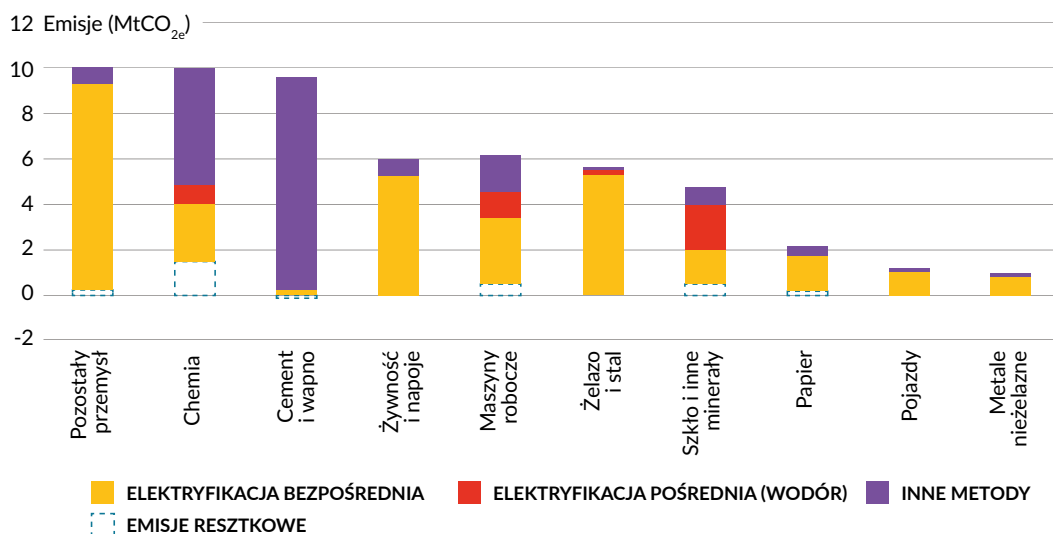
Rysunek 1. Porównanie bezemisyjnej energii elektrycznej potrzebnej do elektryfikacji przykładowego procesu walcowania stali, zużywającego 100 jednostek energii (j.e.)



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

Elektryfikacja pozwala obniżyć emisyjność tej energii, której zużycia nie można już dalej ograniczyć efektywnością energetyczną. The CCC (Climate Change Committee), brytyjski odpowiednik IPCC, wskazuje, że w 8 z 10 analizowanych grup branż przemysłowych elektryfikacja odpowiada za większość redukcji emisji gazów cieplarnianych. Warto nadmienić, że w 7 z tych 8 grup największy udział ma elektryfikacja bezpośrednia, a tylko w jednym przypadku elektryfikacja pośrednia (poprzez zielony wodór, wyprodukowany za pomocą bezemisyjnej energii elektrycznej).

Wykres 6. Sposoby ograniczenia emisji z grup branż przemysłowych w 2050 r. w Wielkiej Brytanii, wraz ze wskazaniem wolumenu emisji resztkowych



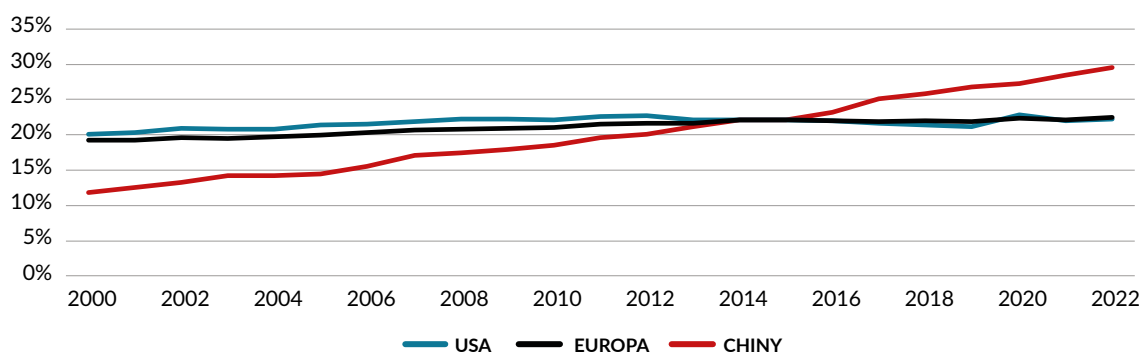
Źródło: E. Pinchbeck et al., *The Seventh Carbon Budget Advice for the UK Government*, Climate Change Committee, 2025, <https://www.theccc.org.uk/publication/the-seventh-carbon-budget/>.

12

Wszystkie duże zmiany niosą ze sobą zarówno zagrożenia, jak i szanse. Przykładem jest Dania, która dzięki przemyślanej strategii przemysłowej potrafiła wykorzystać gwałtowne turbulencje kryzysu naftowego lat 70., by stać się liderem w obszarze efektywności energetycznej i turbin wiatrowych¹⁵. Podobnie dziś umiejętne prowadzenie polityki w realiach permanentnego kryzysu energetycznego i narastającego kryzysu klimatycznego, oparte na globalnym megatrendzie dekarbonizacji, może pozwolić Unii Europejskiej – a w szczególności Polsce – na stworzenie lokalnych nisz i wejście do grona liczących się dostawców rozwiązań dla elektryfikacji przemysłu.

Choć Chiny uzyskały niemal monopolistyczną pozycję w produkcji paneli fotowoltaicznych, baterii, a wkrótce zapewne także samochodów elektrycznych, nie dominują jeszcze na rynku przemysłowych pomp ciepła czy magazynów ciepła. Czas jednak działa na ich korzyść – to właśnie Chiny najszybciej zwiększają stopień elektryfikacji¹⁶, a wkrótce będą chciały przejść z roli odbiorcy do roli dostawcy technologii.

Wykres 7. Porównanie stopnia elektryfikacji (tj. udziału energii elektrycznej w łącznym zużyciu energii) Europy, Stanów Zjednoczonych i Chin



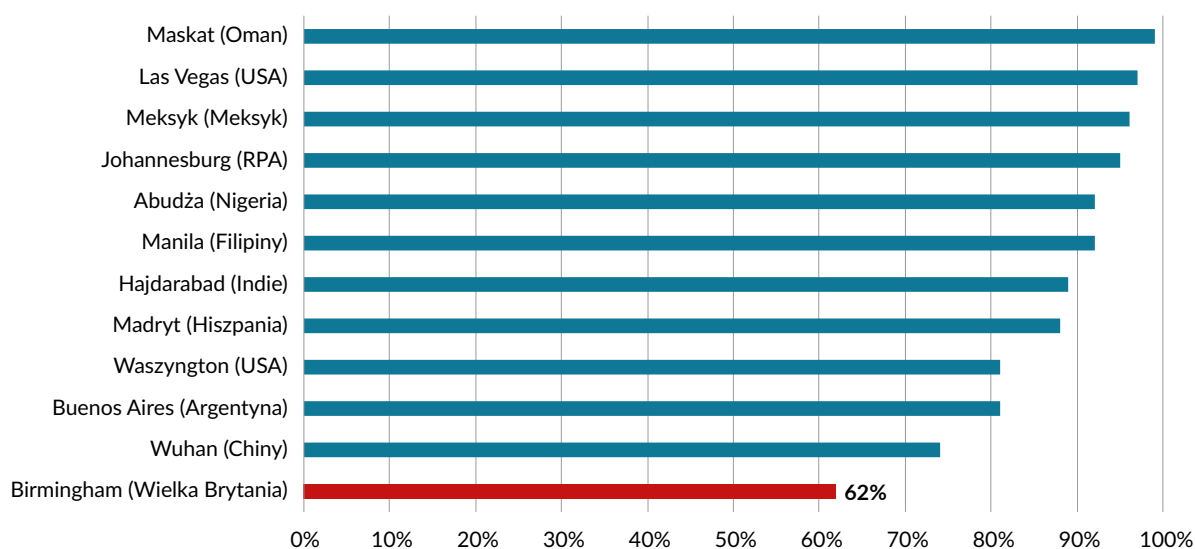
Źródło: D. Walter, K. Bond, S. Butler-Sloss, *The electrification imperative. How a switch from burning fossil fuels to using electricity can unlock the full value of the energy transition*, EMBER, 2025, <https://ember-energy.org/latest-insights/the-electrification-imperative/>.

15 Więcej na temat transformacji ciepłownictwa w Danii w: P. Kleinschmidt, *Jak zbudować nowoczesny system ciepłowniczy w Polsce? Przykłady z Danii*, Forum Energii, 2025, <https://www.forum-energii.eu/jak-zbudowac-nowoczesny-system-cieplowniczy-w-polsce-przyklady-z-danii>.
 16 D. Walter, K. Bond, S. Butler-Sloss, *The electrification imperative. How a switch from burning fossil fuels to using electricity can unlock the full value of the energy transition*, EMBER, 2025, <https://ember-energy.org/latest-insights/the-electrification-imperative/>.

Największym wyzwaniem dla elektryfikacji jest wspomniana ograniczona podaż energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Dynamiczne przestawianie przemysłu z paliw kopalnych na energię elektryczną wymaga budowy nowych źródeł, wdrożenia elastyczności oraz szybkiej rozbudowy systemu przesyłowego i modernizacji systemu dystrybucyjnego – przy dzisiejszym rozumieniu kształtu KSE.

W przyszłości będzie jednak rosło znaczenie lokalnego wytwarzania energii elektrycznej, czy to w ramach klastra energetycznego, czy z własnych źródeł. Dzięki drastycznemu spadkowi kosztów inwestycyjnych OZE (głównie fotowoltaiki i lądowej energetyki wiatrowej) oraz magazynów energii elektrycznej już dziś większość dobowego zużycia energii elektrycznej może pochodzić z połączenia OZE i magazynów energii.

Wykres 8. Możliwy udział energii elektrycznej dostarczanej w trybie ciągłym (24/7) z hybrydowego OZE (połączenie fotowoltaiki i magazynu energii)



13

Źródło: K. Rangelova, D. Jones, *Solar electricity every hour of every day is here and it changes everything*, EMBER, 2025, <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/06/Ember-24-Hour-Solar-Electricity-June-2025-6.pdf>.

Wskazane na wykresie wartości procentowe to średnia wystarczalność (na przestrzeni lat 2005–2023) ciągłej dostawy 1 GW z zestawu: 6 GW fotowoltaiki + magazyn energii o pojemności 17 GWh w wybranych miastach na świecie. Kolorem czerwonym zaznaczono słupek dla Birmingham, ponieważ spośród wskazanych lokalizacji wartość dla tego miasta (62%) w największym stopniu odpowiada potencjałowi dla Polski pod względem szerokości geograficznej i nasłonecznienia.

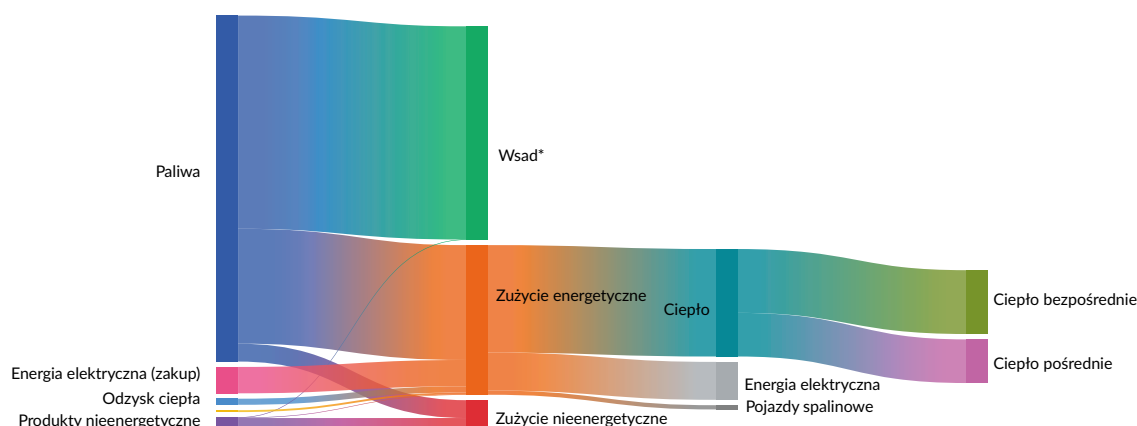
5. Krajobraz energetyczny polskiego przemysłu

Przemysł odpowiada za 1/4 zużycia energii w Polsce. Konsumuje 2547 PJ paliw, z czego 448 PJ (18%) pochodzi z odzysku. Są to paliwa, takie jak gaz koksowniczy, który w sposób nieunikniony powstaje podczas produkcji koksu. Ponadto wykorzystywane są również ciepło z odzysku (45 PJ) oraz minimalne ilości ciepła kupowane z zewnętrznej sieci ciepłowniczej (14 PJ). Także większość zużywanej przez przemysł energii elektrycznej (81%, 194 PJ) pochodzi z Krajowego Systemu Energetycznego.

Energia w przemyśle jest zużywana w celach:

- energetycznych (1102 PJ, 38%) – do zasilania silników spalinowych, np. w ciężarówkach (31 PJ), ale przede wszystkim do produkcji energii elektrycznej (279 PJ) i ciepła (791 PJ),
- nieenergetycznych (201 PJ, 7%) – zużycie smarów czy olejów, wykorzystanie gazu ziemnego – składającego się głównie z metanu (CH_4) – jako źródła cząsteczek wodoru (H_2) niezbędnych do produkcji amoniaku (NH_3),
- jako wsad materiałowy (1571 PJ, 55%) – do rafinerii (ropa naftowa), koksowni (węgiel koksowy), wielkich pieców (koks) czy odazotowni (gaz ziemny zaazotowany).

Wykres 9. Uproszczony schemat przepływów energii w przemyśle



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

* Wsad materiałowy do rafinerii, koksowni, wielkich pieców oraz odazotowni.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

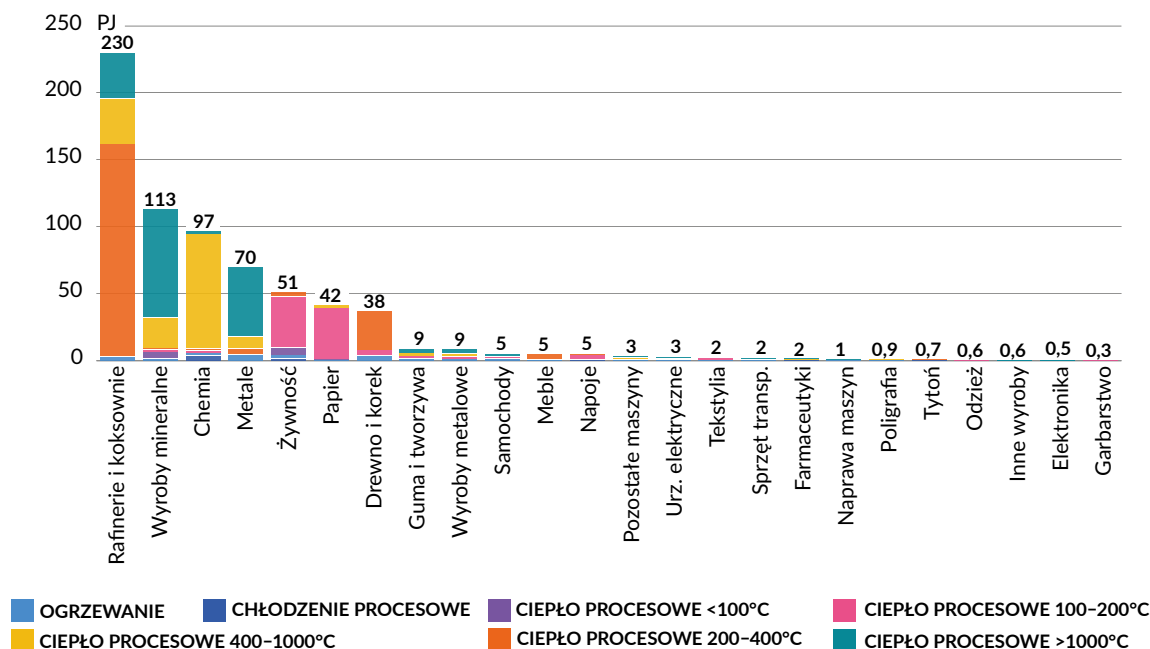
W 2021 r. produkcja ciepła odpowiadała za 75% emisji gazów cieplarnianych polskiego przetwórstwa przemysłowego. Dlatego celem tego raportu m.in. jest określenie potencjału elektryfikacji właśnie tego aspektu produkcji przemysłowej.

5.1. Które branże i w jakim celu zużywają ciepło?

Określenie potencjału elektryfikacji ciepła w poszczególnych branżach wymaga znajomości nie tylko wielkości zużycia, lecz przede wszystkim również charakterystyki tego ciepła – jego temperatury oraz rodzaju procesu, do którego jest wykorzystywane. Inną technologią można zastąpić podgrzewanie wody do 100°C w kotle gazowym, a inną palnik gazowy topiący szkło w temperaturze 1450°C.

Najwięcej ciepła, jak pokazano na wykresie 10, zużywają przemysł rafineryjny i koksowniczy, jednak znaczącymi konsumentami ciepła w Polsce są również gałęzie: mineralna, chemiczna, metalowa, spożywcza, papiernicza czy drzewna.

Wykres 10. Zużycie ciepła w poszczególnych branżach polskiego przemysłu w podziale na poziomy temperaturowe

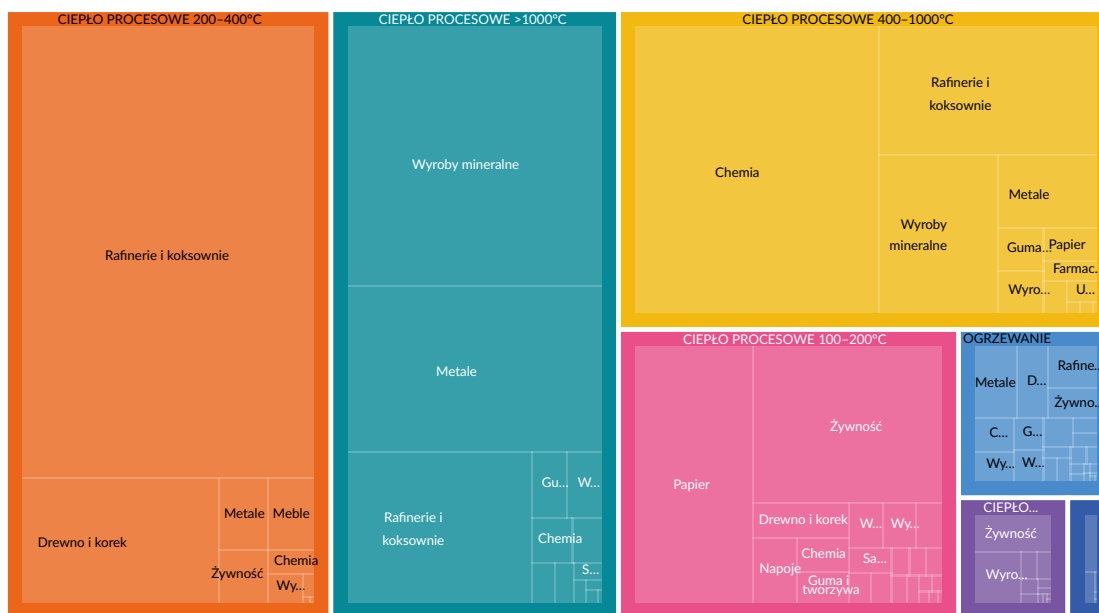


Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

Charakterystyka zużycia ciepła bardzo różni się pomiędzy branżami. W skali całego przetwórstwa przemysłowego największą część stanowi zużycie wysokotemperaturowe. Około 50% zużywanego przez przemysł ciepła ma temperaturę powyżej 400°C (ok. 24% 400–1000°C, 26% powyżej 1000°C). Zużycie to jest jednak silnie skoncentrowane w kilku głównych branżach, w których potrafi stanowić zdecydowaną większość potrzeb cieplnych (np. przemysł chemiczny, mineralny).

Wykres 11. Zużycie ciepła w polskim przemyśle w podziale na branże



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

W dalszej części raportu przedstawiono kluczowe informacje dla określenia możliwości elektryfikacji danego procesu dostępnymi dziś technologiami (lub braku takiej możliwości) poprzez podział poziomów temperaturowych na poszczególne procesy produkcyjne.

1. Ogrzewanie

W każdej z branż naturalnie konieczne jest ogrzewanie pomieszczeń biurowych i hal produkcyjnych. Udział ogrzewania w łącznym zużyciu ciepła wynosi średnio w przetwórstwie przemysłowym 3,9%, z dużą rozpiętością między poszczególnymi gałęziami (od ok. 1% w branży papierniczej do ok. 27% w branży motoryzacyjnej). Ogrzewanie nie jest zasilane wyłącznie ze spalania paliw w fabryce, w niektórych branżach jest realizowane ciepłem z sieci ciepłowniczej lub z odzysku. To, co pozostaje, może zostać **w pełni zelektryfikowane** za pomocą pomp ciepła.

2. Chłodzenie procesowe

W niektórych branżach, głównie w sektorze spożywczym oraz chemicznym, potrzebne jest również chłodzenie procesowe. Klimatyzowanie pomieszczeń i hal, a także część chłodzenia procesowego (np. podczas liofilizacji) są już zasilane energią elektryczną. Chłodzenie procesowe zasilane jest jednak głównie ciepłem pochodzącym ze spalania (ciepło to tylko częściowo pochodzi z odzysku). Na potrzeby obliczeń przyjęto, że chłodzenie procesowe, dziś realizowane układami chłodniczymi ab- lub adsorpcyjnymi, może być **w pełni zelektryfikowane** za pomocą **chłodziarek sprężarkowych**.

Niemniej jednak, w poszczególnych zakładach, w których będzie zachodziła potrzeba jednoczesnego chłodzenia (w jednej części procesu produkcyjnego) oraz ogrzewania (w innej części), przy odpowiednich parametrach temperatur i ciśnień, możliwe będzie zastosowanie dużo efektywniejszej przemysłowej pompy ciepła, odbierającej ciepło z jednego procesu i przekazującej je do innego. Wskaźnik COP (ang. *Coefficient of Performance*) informujący o tym, ile razy więcej ciepła otrzymuje się w stosunku do włożonej do procesu energii elektrycznej, przy takim zastosowaniu może przekraczać 10 (w porównaniu z typowym COP na poziomie 3–4)¹⁷.

3. Ciepło procesowe do 100°C

Najniższy poziom temperaturowy ciepła wykorzystywanego w procesie produkcyjnym to ciepło procesowe o temperaturze do 100°C. Wykorzystywane jest ono przede wszystkim podczas suszenia, utwardzania cementu przy prefabrykacji lub przygotowywania masy papierniczej. W zależności od konkretnego zastosowania, ciepło to można **w pełni zelektryfikować**, stosując przemysłową pompę ciepła (jeśli proces wykorzystuje gorącą wodę lub parę niskoprężną) albo ogrzewaniem oporowym, podczerwonym, mikrofalowym lub falami radiowymi.

4. Ciepło procesowe o temperaturze 100–200°C

Ciepło z tego zakresu temperatur jest w większości wykorzystywane do produkcji pary technologicznej mającej różnorodne zastosowania w większości branż przemysłowych (np. do napędu, pasteryzacji, dostarczania ciepła). Ciepło o tym poziomie temperaturowym jest ponadto wykorzystywane do suszenia oraz do niskotemperaturowej obróbki cieplnej (np. odpuszczania w przemyśle stalowym).

Wytwarzanie ciepła w temperaturach 100–200°C może być **w pełni zelektryfikowane**. Jeżeli proces wymaga bezpośredniego dostarczenia ciepła (bez pośrednictwa pary wodnej lub gorącej wody), może być zelektryfikowany ogrzewaniem oporowym, podczerwonym lub mikrofalowym. Jeżeli natomiast proces wykorzystuje parę, może być zelektryfikowany przemysłową pompą ciepła.

17 IEA, *Annex 58, High-Temperature Heat Pumps, Task 1-Technologies*, 2023, <https://heatpumpingtechnologies.org/content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>.

Zakłady, które posiadają zasób ciepła odpadowego w postaci pary wodnej o odpowiednich parametrach (powstającej np. w procesach odparowania lub zagęszczania), mogą wykorzystać mechaniczną rekompresję pary (MVR), która cechuje się o wiele wyższym COP od konwencjonalnej pompy ciepła o zamkniętym obiegu, niejednokrotnie przekraczającym 10. Ze względu na specyfikę tego rozwiązania (nie w każdym zakładzie można je zastosować z uwagi na konieczność odpadowej pary wodnej) MVR nie zostało uwzględnione w dalszych obliczeniach.

5. Ciepło procesowe o temperaturze 200–400°C

Większość energii o tych parametrach wykorzystywana jest w przemyśle rafineryjnym, który ze względu na wymagane niezwykle wysokie gęstości energii jest trudny do elektryfikacji. Ponadto ciepło to służy do produkcji pary technologicznej o wyższych parametrach (wykorzystywanej przede wszystkim w przemyśle drzewnym) oraz do suszenia i pieczenia – zwłaszcza w przemyśle spożywczym.

Ciepło z tego przedziału temperaturowego może zostać **zelektryfikowane w 21,6%** (jeśli wyłączyć z tej grupy procesy rafineryjne, elektryfikacja możliwa jest w 100%). Możliwe do wykorzystania technologie to przede wszystkim kotły elektrodowe (para technologiczna) oraz ogrzewanie oporowe, podczerwone lub mikrofalowe (pieczenie, suszenie).

6. Ciepło procesowe o temperaturze 400–1000°C

Większość ciepła o tych parametrach wykorzystywana jest w procesie krakingu parowego – to najważniejszy proces branży petrochemicznej, wykorzystywany do produkcji etylenu i propylenu, czyli podstawowych budulców tworzyw sztucznych. Zbudowano już pierwsze zelektryfikowane instalacje pilotażowe (krakery elektryczne)¹⁸, jednak ze względu na olbrzymie ilości energii elektrycznej oraz jej wymaganą gęstość, należy uznać, że dziś ten proces jest trudny do zelektryfikowania, podobnie jak zachodzący w tym zakresie temperaturowym kraking katalityczny w rafineriach. Również procesy kalcynacji (w przemyśle papierniczym i mineralnym) są trudne do elektryfikacji, m.in. ze względu na wymagane bardzo duże gęstości energii.

W każdym z tych procesów elektryfikacja jest technicznie możliwa, jednak brakuje rozwiązań komercyjnie dostępnych. Poziom temperaturowy 400–1000°C jest zatem **możliwy do elektryfikacji w 11,3%** – w zależności od procesu za pomocą ogrzewania oporowego, indukcyjnego lub łukowego. Dotyczy to głównie obróbki wstępnej, cieplnej i końcowej.

7. Ciepło procesowe o temperaturze powyżej 1000°C

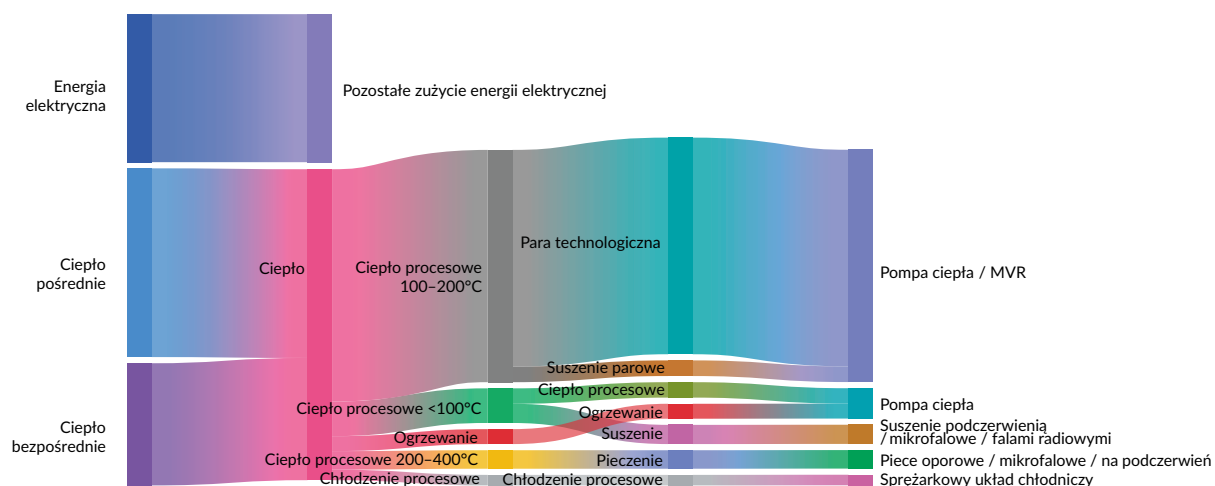
To najwyższy poziom temperaturowy, który jest zdominowany przez różnego rodzaju piece, m.in. wykorzystywane do topienia, spiekania, wypołu, odlewania. Większość zużycia przypada na sektory: mineralny (wypał klinkieru, ceramiki, topienie szkła) i metalowy (produkcja wyrobów stalowych i z metali nieżelaznych, głównie miedzi i cynku). Ciepło procesowe o temperaturze powyżej 1000°C jest **możliwe do elektryfikacji w 44,4%** za pomocą ogrzewania indukcyjnego, oporowego i łukowego (głównie w branżach metalowych).

Szczegółowe zestawienie dotyczące zużycia ciepła przez poszczególne technologie zawarto w załączniku 2 na s. 54.

5.2. Ile ciepła można zelektryfikować w poszczególnych branżach?

Obraz wykorzystania ciepła w polskim przemyśle, wraz z przedstawieniem zachodzących w danej branży procesów przemysłowych oraz możliwych sposobów ich bezpośredniej elektryfikacji, przedstawia wykres 12.

Wykres 12. Zużycie ciepła w procesach przemysłowych oraz możliwe sposoby ich elektryfikacji na przykładzie przemysłu spożywczego

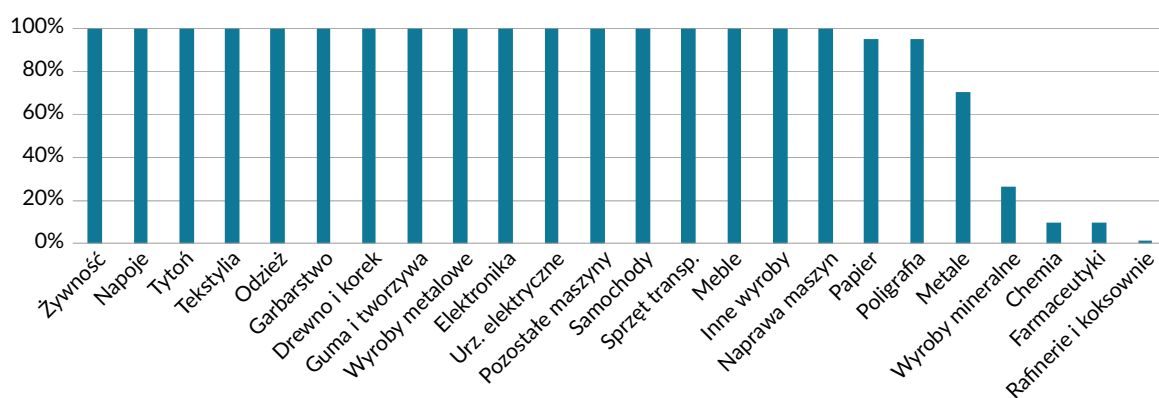


Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

18 Stopień elektryfikacji produkcji ciepła w branżach przetwórstwa przemysłowego, w zależności od ilości zużywanego przez nie ciepła, wykorzystywanych procesów oraz możliwości elektryfikacji poszczególnych zastosowań, został przedstawiony na wykresie 14. W 17 z 24 branż przetwórstwa przemysłowego jest to możliwe w 100%. Z użyciem dostępnych technologii branża papiernicza może zostać zelektryfikowana w 95%, metalowa w 70%, mineralna w 26%, chemiczna w 10%, a rafineryjna w 1%.

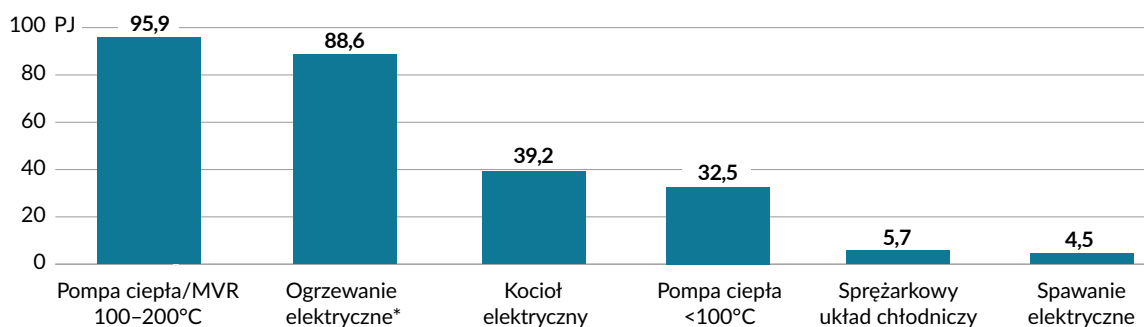
Wykres 13. Potencjał elektryfikacji ciepła dostępnymi technologiami w podziale na branże



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

Biorąc pod uwagę gotowość i dostępność technologii oraz charakter i sektorową dystrybucję procesów produkcyjnych w polskim przemyśle, największy wkład w elektryfikację procesów przemysłowych mają **pompy ciepła** – odpowiadają one za prawie połowę (48,2%) możliwego do zelektryfikowania ciepła. Łącznie technologie elektryfikacji ciepła pośredniego (poza pompami ciepła również kotły elektrodowe) odpowiadają za 62,9% dostępnego do elektryfikacji ciepła. Wśród pozostałych 37,1% przypadających ciepłu bezpośredniemu największą rolę odgrywa szeroko rozumiane ogrzewanie elektryczne (głównie ogrzewanie oporowe w przemyśle mineralnym oraz indukcyjne w metalowym).

Wykres 14. Potencjał redukcji zużycia ciepła ze spalania paliw w podziale na technologie elektryfikacyjne



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

* Miks technologii: ogrzewanie indukcyjne, oporowe, łukowe, fale mikrofalowe, radiowe lub podczerwone, specyficzne suszenie pompami ciepła – w zależności od sektora i procesu.

Po uwzględnieniu miks paliwowego każdego poziomu temperaturowego zużycia ciepła w poszczególnych branżach, można określić zarówno redukcję zużycia paliw, jak i emisji gazów cieplarnianych. Po elektryfikacji łączna potencjalna redukcja zużycia poszczególnych paliw wynosi:

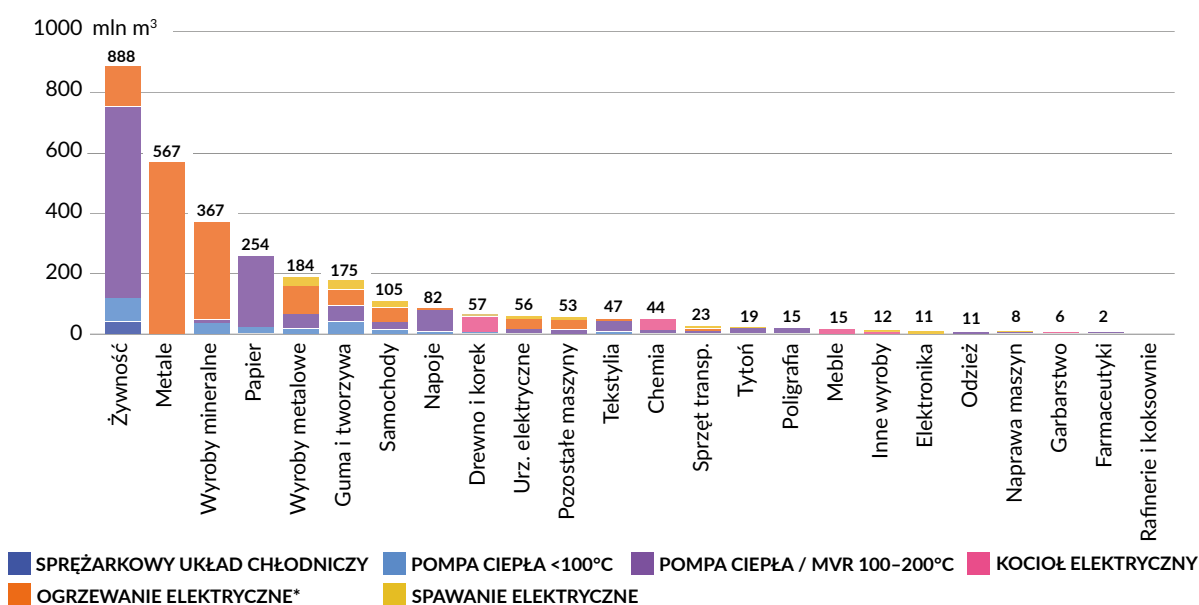
- ok. 109 PJ (ok. 3 mld m³) gazu ziemnego,
- ok. 44 PJ (ok. 2 mln ton) węgla kamiennego energetycznego,
- ok. 8 PJ ropy i produktów ropopochodnych.

Wynikająca z tego redukcja emisji gazów cieplarnianych wynosi ok. 21 mln ton CO₂.

19

Jak pokazuje wykres 15, najwyższa redukcja zużycia gazu ziemnego jest możliwa w przemyśle spożywczym (głównie przy zastosowaniu pomp ciepła), metalowym (głównie wykorzystując piece indukcyjne, ale też ogrzewanie oporowe i łukowe) oraz mineralnym (głównie poprzez ogrzewanie oporowe).

Wykres 15. Potencjał redukcji zużycia gazu ziemnego w podziale na branże i technologię elektryfikacyjną



■ SPRĘŻARKOWY UKŁAD CHŁODNICZY ■ POMPA CIEPŁA <100°C ■ POMPA CIEPŁA / MVR 100–200°C ■ KOCIOŁ ELEKTRYCZNY
 ■ OGRZEWANIE ELEKTRYCZNE* ■ SPAWANIE ELEKTRYCZNE

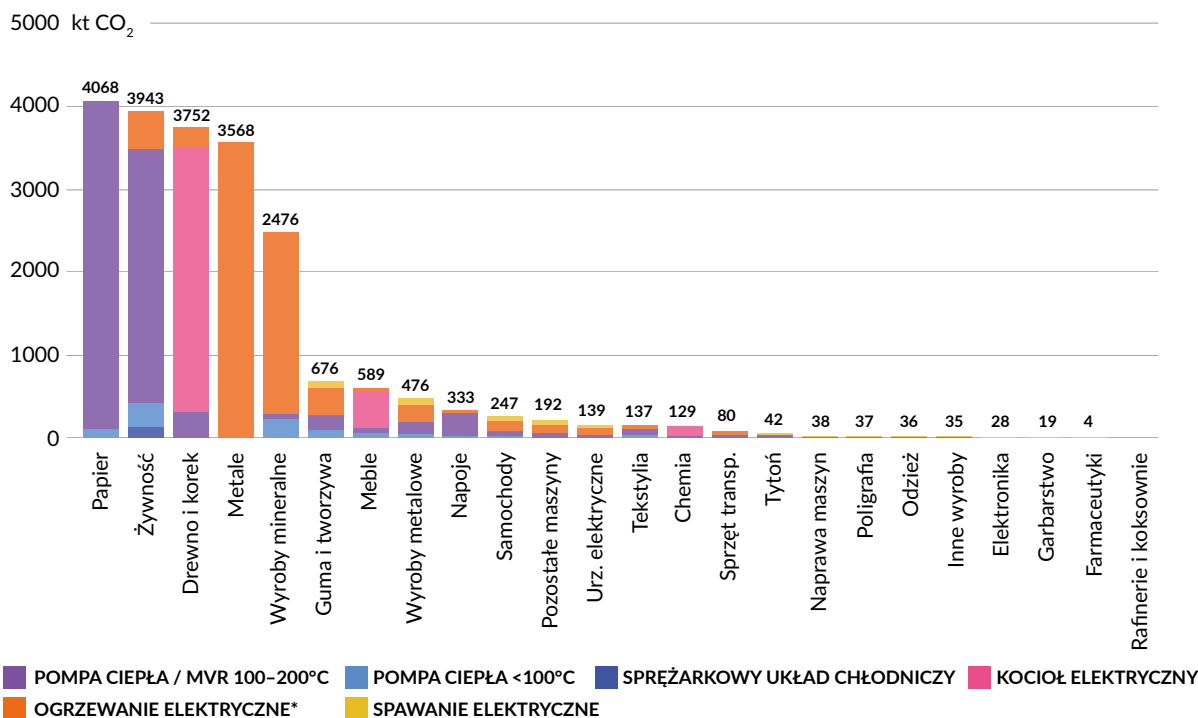
Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

* Miks technologii: ogrzewanie indukcyjne, oporowe, łukowe, fale mikrofalowe, radiowe lub podczerwone, specyficzne suszenie pompami ciepła – w zależności od sektora i procesu.

Najwyższe potencjalne redukcje emisji gazów cieplarnianych poprzez elektryfikację można uzyskać w branżach papierniczej, spożywczej, drzewnej, metalowej i mineralnej (wykres 16).

Wykres 16. Potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych w podziale na branże i technologię elektryfikacyjną



20

Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

* Miks technologii: ogrzewanie indukcyjne, oporowe, łukowe, fale mikrofalowe, radiowe lub podczerwone, specyficzne suszenie pompami ciepła – w zależności od sektora i procesu.

6. Wpływ elektryfikacji przemysłu na system elektroenergetyczny

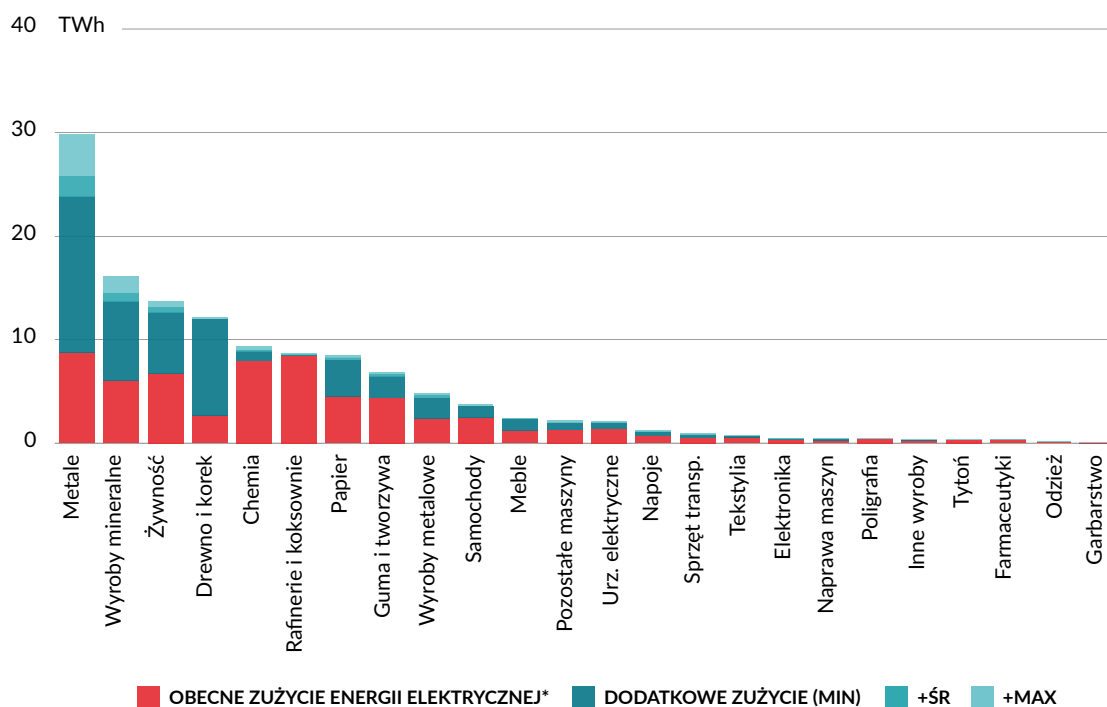
Elektryfikacja przemysłu jest procesem stopniowym i rozłożonym w czasie. Jego tempo jest zależne od uwarunkowań rynkowych i decyzji politycznych dotyczących wsparcia, jak również od dostępności czystej energii elektrycznej i możliwości jej dostarczenia.

Elektryfikacja produkcji ciepła zwiększy zapotrzebowanie na energię elektryczną. W związku z tym konieczne jest, by plany rozbudowy i modernizacji krajowych sieci przesyłowych uwzględniały zwiększone zużycie energii elektrycznej w przemyśle.

Obecne zużycie energii elektrycznej w tym sektorze wynosi 61 TWh, natomiast po elektryfikacji tej części ciepła, którą można zelektryfikować za pomocą dostępnych dziś technologii, wzrośnie ono do 118 TWh (w zależności od sprawności zainstalowanych urządzeń może być to od 114 do 126 TWh)¹⁹.

¹⁹ Zapotrzebowanie na dodatkową energię elektryczną może być niższe niż wskazano, ze względu na potencjalne korzyści wynikające z zainstalowania MVR zamiast przemysłowej pompy ciepła w zakładach z dostępem do ciepła odpadowego w postaci pary wodnej o odpowiednich parametrach oraz z wykorzystania przemysłowej pompy ciepła zamiast chłodziarki sprężarkowej w fabrykach, w których występuje jednoczesna potrzeba chłodzenia i ogrzewania procesowego o odpowiednich parametrach. W obu przypadkach COP jest znacznie wyższy niż w przyjętych do obliczeń założeniach. Z innej strony, przyszłe zużycie energii może być wyższe niż obliczono, ze względu na ograniczoną dostępność ciepła odpadowego lub jego niskie parametry (temperaturę). W niektórych zakładach produkcyjnych może się bowiem okazać, że COP przemysłowej pompy ciepła zasilanej zbyt niską temperaturą i generującą ciepło o zbyt wysokiej temperaturze jest na tyle niski, że bardziej opłacalna okaże się inwestycja w tańszy (pod względem kosztów CAPEX) kocioł elektrodowy, który jednak zużywa więcej energii elektrycznej.

Wykres 17. Wpływ elektryfikacji na zużycie energii elektrycznej w poszczególnych branżach*



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

21

* Obecne zużycie wskazane jest na czerwono. Minimalne dodatkowe zużycie to słupki „Dodatkowe zużycie (MIN)”, średnie to suma „Dodatkowe zużycie (MIN)” oraz „+ŚR”, a maksymalne to suma dwóch poprzednich oraz „+MAX”.

Wraz z przestawianiem zasilania produkcji przemysłowej ze spalania paliw kopalnych na energię elektryczną, naturalnie wzrośnie zapotrzebowanie na moc. Obecna średnia²⁰ tego zapotrzebowania wynosi szacunkowo 9,6 GW. Przy utrzymaniu obecnej struktury i trybu produkcji średnia wzrośnie po elektryfikacji do 19,4 GW (w zależności od sprawności zainstalowanych urządzeń może być to od 18,8 do 20,5 GW).

Kluczowe jest zastrzeżenie, że średnie wartości zapotrzebowania na moc występują przy utrzymaniu obecnego, przeważnie nieelastycznego profilu produkcji. Dla części procesów przemysłowych możliwa jest jednak optymalizacja pracy pod kątem sytuacji w systemie elektroenergetycznym. Tak jak dziś dla maksymalizacji zysku rezygnuje się z produkcji np. mebli w weekendy, ze względu na podwyższone koszty pracy, w przyszłości będzie możliwa rezygnacja z produkcji w godzinach najwyższych cen energii elektrycznej (a więc w sytuacji w systemie elektroenergetycznym, w której podaż energii ledwo pokrywa popyt). Nie jest to jednak możliwe przy produkcji szkła płaskiego czy stali pierwotnej wytwarzanych w trybie ciągłym.

Potencjał sektora przemysłu w zakresie elastycznej pracy powinien stać się przedmiotem przyszłych badań, jednak już dziś można z pewnością stwierdzić, że obliczone 9,8 GW (od 9,2 do 10,9 GW) dodatkowego zapotrzebowania nie jest w całości poborem sztywnym. Istnieje bowiem możliwość dostosowania profilu pracy (chwilowego zużycia) do warunków pogodowych czy bilansowych w systemie. Dodatkową niewiadomą, potencjalnie obniżającą wymagane inwestycje w KSE w celu dostarczenia dodatkowych wymaganych GW, jest możliwość pracy poza systemem – wyspowo. W tym trybie zakład przemysłowy jest zasilany przez własne źródła i bilansowany własnymi magazynami energii elektrycznej, ciepła czy wodoru. Zagadnienie to wymaga jednak oddzielnego zbadania.

20

Szacunkowa średnia moc pobierana przez przemysł jest określona na podstawie rocznego zużycia, szacowanego czasu pracy z pełnym obciążeniem (na podstawie m.in. trybu pracy – ciągły, dwuzmianowy, z weekendami lub bez itd.) oraz stopnia wykorzystania zainstalowanych mocy produkcyjnych.

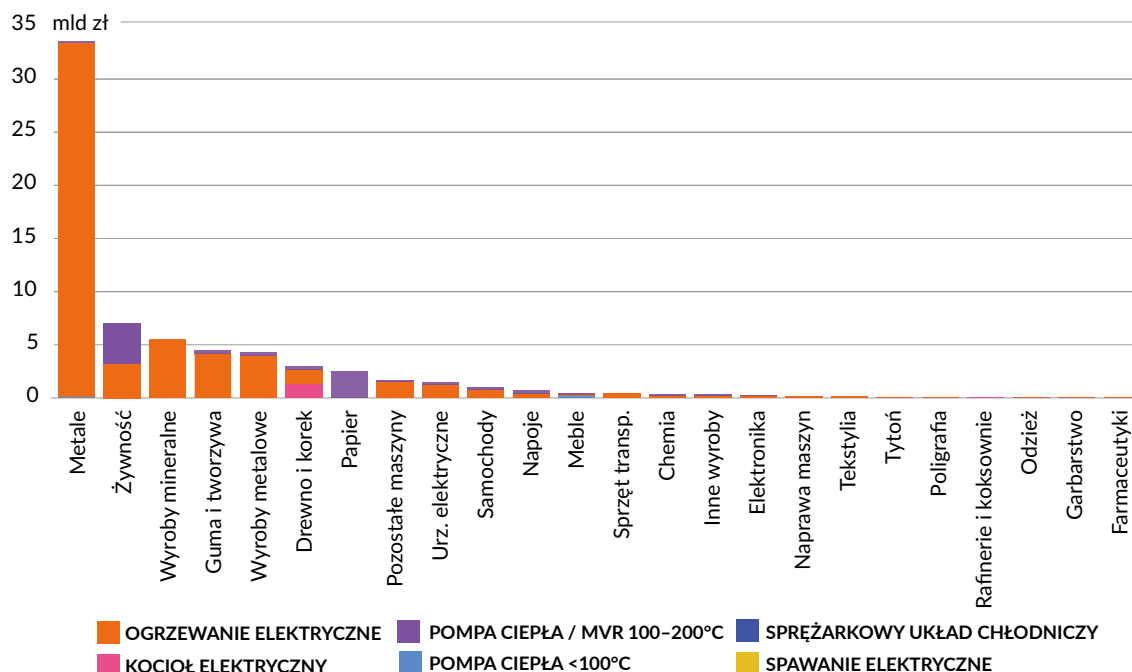
7. Koszty elektryfikacji przemysłu

Elektryfikacja jest szansą na modernizację przemysłu i ominięcie etapu stosowania technologii przejściowych, które pogłębiają krajowe uzależnienie od importu energii i zwiększają ryzyka dla przedsiębiorstw ze względu na większą ekspozycję na zmienność cen na światowych rynkach. Z innej strony, elektryfikacja w przemyśle często jest postrzegana jako jeszcze technicznie niewykonalna, a jeżeli już, to w związku z wysokimi kosztami. Wykonalność technologiczna poszczególnych rozwiązań została opisana w rozdziale 5, natomiast w niniejszej części zostanie określony koszt elektryfikacji polskiego przemysłu.

W rozdziale 5 wskazano technologie elektryfikacyjne dla poszczególnych procesów produkcyjnych. Wykres 12 (s. 18) przedstawia zużycie energii dla każdego z procesów. Po wzięciu pod uwagę większej skuteczności ogrzewania²¹ za pomocą technologii zelektryfikowanych²², oraz po uwzględnieniu sprawności produkcji ciepła (wskazanych w rozdziale 9), można obliczyć zużycie energii elektrycznej przez każdą z technologii.

Co ważne, koszty CAPEX²³ zwyczajowo wskazywane są w przeliczeniu na moc, a nie na zużycie energii elektrycznej. Z tego powodu konieczne było oszacowanie średniorocznego czasu pracy każdego z procesów. Wzięto przy tym pod uwagę zarówno średnie wykorzystanie mocy zainstalowanych²⁴, jak i charakter pracy danej branży (praca ciągła, system dwuzmianowy, trzymianowy, z weekendami lub bez). Na tej podstawie określono konieczną średnioroczną roboczą moc każdej z technologii, która stanowi podstawę do określenia kosztów CAPEX.

Wykres 18. Nakłady inwestycyjne na technologie elektryfikacyjne



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

* Miks technologii: ogrzewanie indukcyjne, oporowe, łukowe, fale mikrofalowe, radiowe lub podczerwone, specyficzne suszenie pompami ciepła – w zależności od sektora i procesu.

** Brak informacji o nakładach inwestycyjnych wymaganych w przypadku spawania plazmowego.

21 Na podstawie: European Commission, JRC-IDEES-2021, Joint Research Centre (JRC), 2024, <http://data.europa.eu/89h/82322924-506a-4c9a-8532-2bdd30d69bf5>.

22 Ze względu np. na ogrzewanie bezpośrednio materiału, a nie dodatkowo powietrza dookoła czy mniejsze straty ciepła do otoczenia.

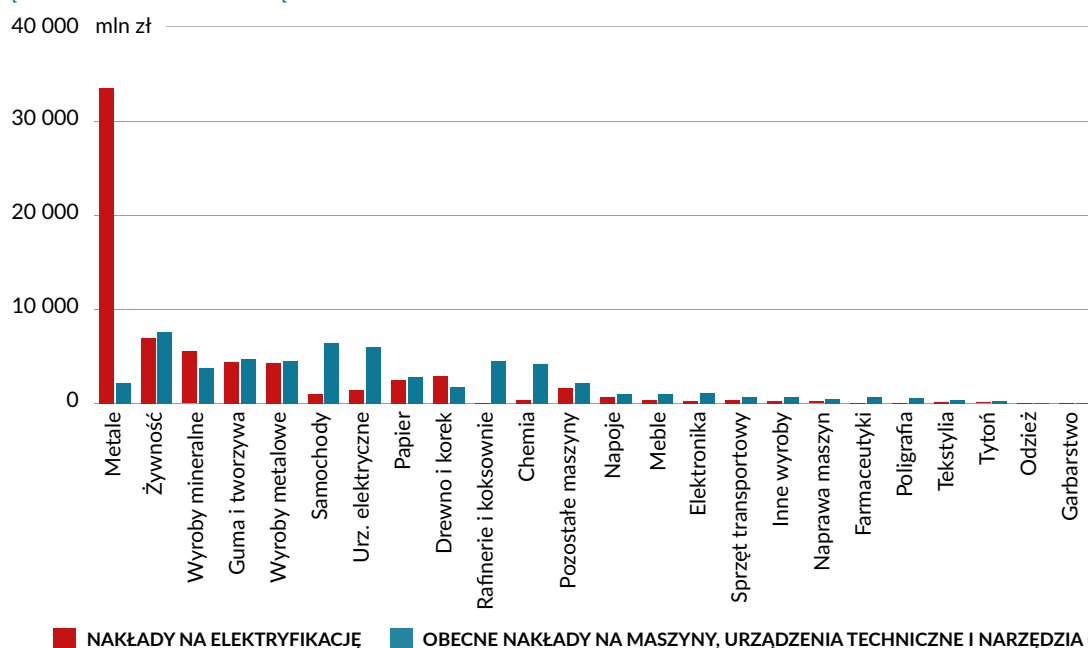
23 CAPEX (ang. *CAPital Expenditures*) – nakłady kapitałowe na inwestycję, tj. informacja o tym, ile pieniędzy trzeba wydać, żeby coś kupić/zbudować.

24 European Commission, JRC-IDEES-2021, Joint Research Centre (JRC).

Uzyskane w ten sposób szacunkowe nakłady inwestycyjne na technologie elektryfikacyjne wynoszą 67 mld zł (od 14 do 120 mld zł)²⁵. Prawie połowa z tych inwestycji dotyczy branży metalowej, przede wszystkim w związku z elektryfikacją procesów topienia i odlewania metali nieżelaznych. Przedstawione na wykresie 18 koszty nie są jednak w pełni dodatkowymi nakładami, rozumianymi jako koszty transformacji. Polski przemysł przetwórczy dysponuje bowiem maszynami, urządzeniami technicznymi i narzędziami zużyтыми średnio w 63,1%. Najmniejsze zużycie urządzeń jest notowane w branży produkującej urządzenia elektryczne (53,3%), a największe w branży produkcji odzieży (78,6%)²⁶. Przy tym poziomie zużycia maszyn i urządzeń inwestycje odtworzeniowe są nieuniknione. Jako dodatkowy koszt inwestycyjny związany z elektryfikacją, należy więc traktować jedynie potencjalną różnicę pomiędzy nakładami na konwencjonalne aktywa wytwórcze oraz te zelektryfikowane.

Oszacowaną kwotę inwestycji warto również zestawić z obecną wartością maszyn, urządzeń technicznych i narzędzi (dalej: „maszyn”), która w przetwórstwie przemysłowym wyniosła w 2022 r. ok. 621 mld zł. Związane z nimi inwestycje w tym samym roku wyniosły natomiast 57,6 mld zł²⁷. Oznacza to, że obliczone 67 mld zł (14–120 mld zł) sumarycznych nakładów na technologie elektryfikacyjne jest porównywalne z obecnym jednorocznym budżetem na inwestycje w środki trwałe w postaci maszyn.

Wykres 19. Nakłady inwestycyjne na elektryfikację w porównaniu z wydatkami polskiego przemysłu na maszyny, urządzenia techniczne i narzędzia w 2022 r.



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

W większości branż sumaryczne nakłady inwestycyjne na technologie elektryfikacyjne są porównywalne z dzisiejszymi wydatkami na maszyny. Niemniej jednak należy podkreślić, że w przypadku niektórych urządzeń zelektryfikowanych koszty te są wyższe niż koszty stosowania ich konwencjonalnych odpowiedników, np. instalacja przemysłowej pompy ciepła kosztuje więcej niż montaż kotła gazowego.

²⁵ Istnieje bardzo duży zakres niepewności wartości wymaganych inwestycji ze względu na nakładanie się zakresu wymaganych kosztów CAPEX na zakres wymaganej mocy tych technologii (CAPEX jest bowiem wyrażony w euro/MW). W niemal nierealnie optymistycznej wersji (tj. wymagana moc jest najniższa, CAPEX najniższy) jest to 13 mld zł, w niemal nierealnie pesymistycznej (tj. wymagana moc jest najwyższa, a CAPEX najwyższy) wynosi 143 mld zł. Wskazana w tekście wartość 67 mld zł została obliczona przy średnim zapotrzebowaniu na moc oraz średnich kosztach CAPEX. Przyjęto kurs zł/euro na poziomie 4,23.

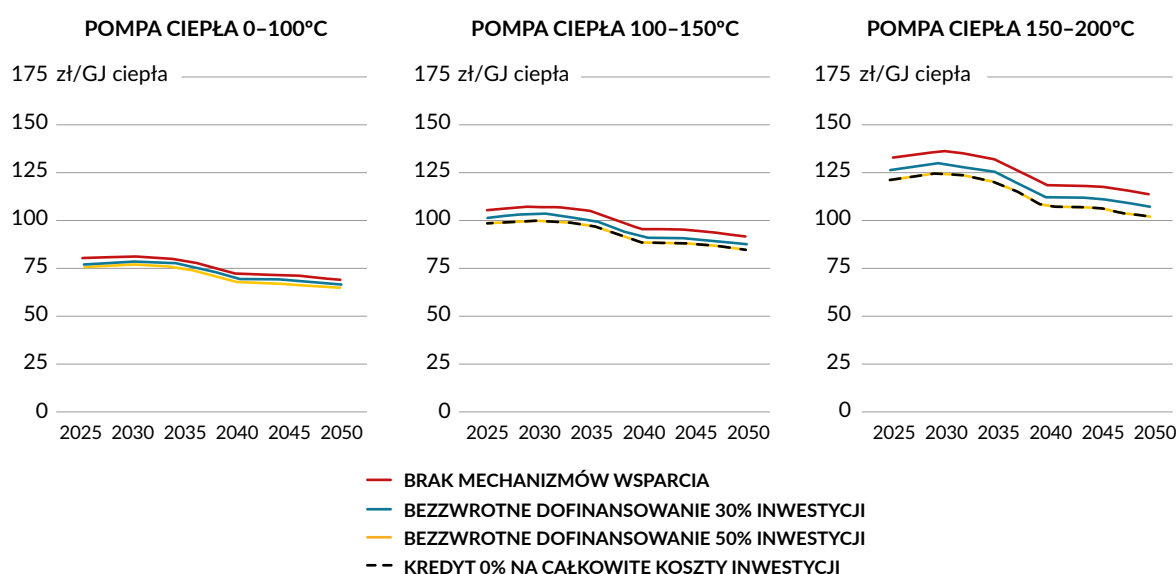
²⁶ GUS, *Rocznik Statystyczny Przemysłu 2023, 2024*, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-przemyslu-2023,5,17.html>.

²⁷ *Ibidem*.

Istnieją jednak mechanizmy wsparcia, pozwalające obniżyć ten dodatkowy CAPEX, np. pilotażowa aukcja Funduszu Innowacyjności, która dysponuje budżetem 1 mld euro²⁸ na wsparcie projektów mających na celu dekarbonizację ciepła przemysłowego poprzez innowacyjne technologie elektryfikacji (m.in. pompy ciepła, kotły elektryczne, ogrzewanie oporowe, ogrzewanie indukcyjne, ogrzewanie plazmowe).

Co ważne, jak wskazano na wykresie 20, to nie koszty inwestycji są głównym determinantem opłacalności elektryfikacji. Ze względu na bardzo duże zużycie energii, to właśnie jej koszt jest główną pozycją w rachunku rentowności. Nawet obniżenie kosztu inwestycji o połowę (wykres 20, linia „bezzwrotne dofinansowanie 50% inwestycji”) obniża koszt ciepła produkowanego przez przemysłowe pompy ciepła o 6–13%, a jest to technologia, w przypadku której udział kosztu inwestycji w całkowitym koszcie użytkowania jest jednym z najwyższych.

Wykres 20. Wpływ wsparcia finansowego na etapie inwestycji na koszt produkcji ciepła



24

Źródło: K. Janik i B. Swoczyna, *Produkcja pod napięciem #2. Aspekty finansowe elektryfikacji przetwórstwa przemysłowego w Polsce*, Instytut Reform, 2025, <https://ireform.presb.pl/publikacja/produkcja-pod-napieciem-2-aspekty-finansowe-elektryfikacji-przetworstwa-przemyslowego-w-polsce-raport-instytutu-reform/>.

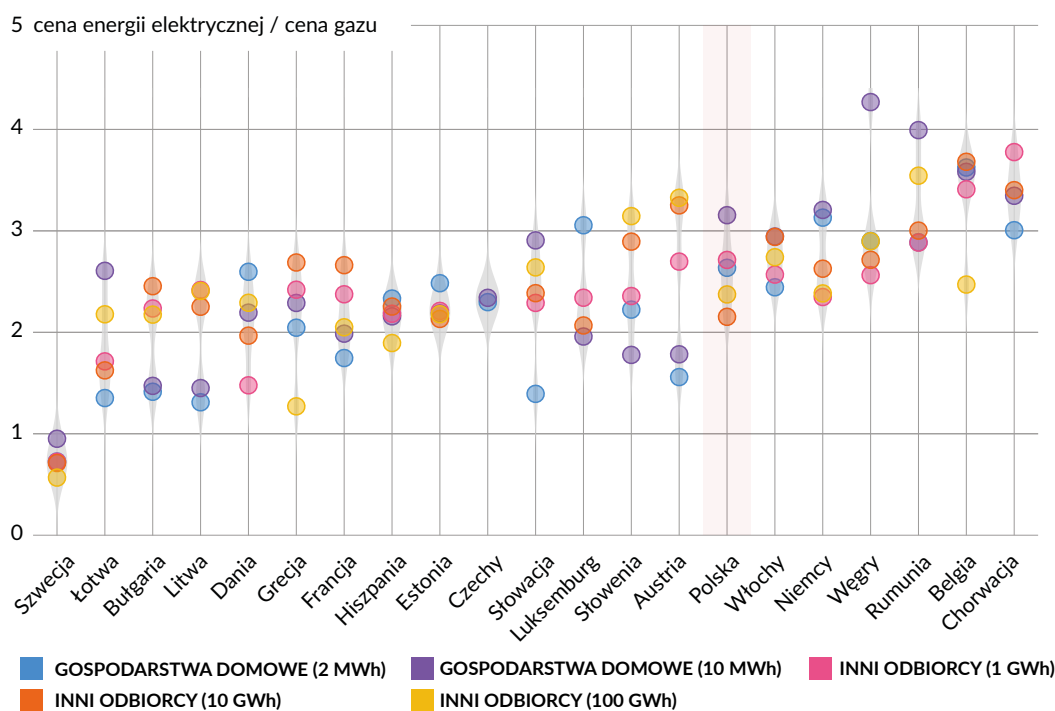
Różnicę pomiędzy kosztami OPEX²⁹ technologii konwencjonalnych i zelektryfikowanych można w dużej mierze sprowadzić do stosunku pomiędzy ceną energii elektrycznej a ceną gazu – dominującego paliwa zasilającego technologie, w które dziś inwestuje przemysł. Jak zobrazowano na wykresie 21, dla odbiorców przemysłowych koszt energii z sieci elektroenergetycznej jest dwa–trzy razy wyższy niż koszt energii pochodzącej z gazu ziemnego. Jest to przeciętny wynik na tle innych państw UE, co można interpretować również w ten sposób, że przeciętnie UE nie jest pod tym względem przygotowana do wymaganej przyspieszonej elektryfikacji przemysłu.

Elektryfikacja nie wydarzy się, jeżeli koszt produkcji danego dobra będzie wyższy po elektryfikacji niż przed nią. Częściowo lukę tę uzupełni wyższa sprawność zelektryfikowanych procesów (do produkcji danego dobra będzie potrzebne mniej energii elektrycznej niż obecnie gazu). Wciąż jednak bez sprowadzenia stosunku ceny energii elektrycznej do gazu w okolice 1, jak ma to miejsce w Szwecji, szeroka (a nie punktowa i dotycząca tylko wybranych procesów) elektryfikacja nie będzie mogła się wydarzyć.

28 EC, *Innovation Fund*, https://cinea.ec.europa.eu/programmes/innovation-fund_en.

29 OPEX (ang. *Operational Expenditures*) – nakłady na działalność operacyjną, tj. informacja o tym, ile kosztuje zasilenie i utrzymanie w ruchu danej maszyny.

Wykres 21. Stosunek cen energii elektrycznej do gazu ziemnego w państwach UE dla różnych grup odbiorców*



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Eurostatu.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

25

* Kropki na wykresie oznaczają stosunek końcowej ceny energii elektrycznej (a więc z kosztami dystrybucji oraz niedającymi się odliczyć podatkami i daninami) do ceny gazu ziemnego dla danej grupy odbiorców. Przykładowo punkt „inni odbiorcy (1 GWh)” oznacza iloraz końcowej ceny energii elektrycznej (przy zużyciu 1 GWh) do końcowej ceny gazu ziemnego (przy zużyciu 1 GWh) dla odbiorców końcowych niebędących gospodarstwem domowym.

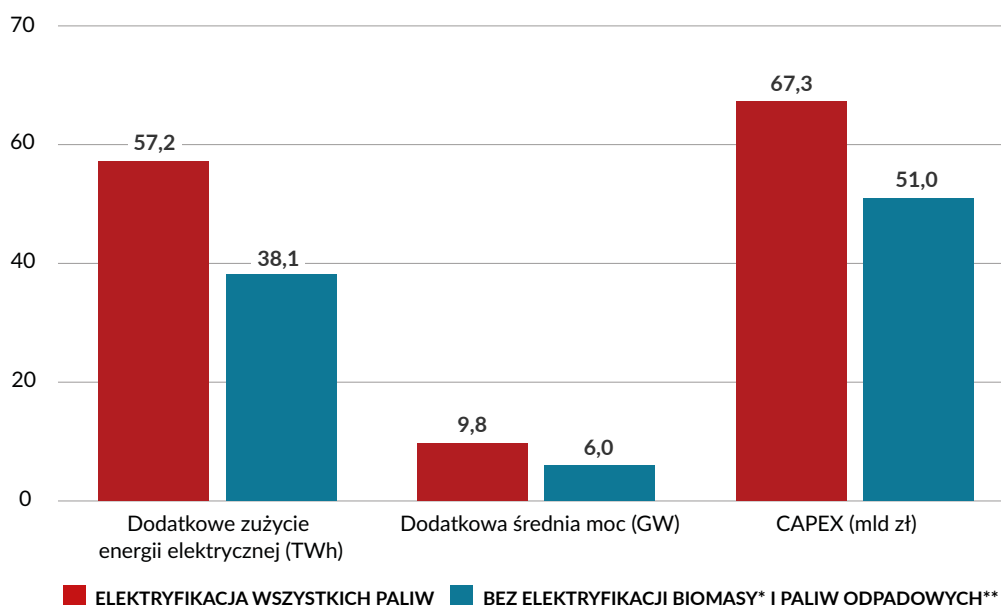
8. Rola biomasy i odpadów w procesach przemysłowych

Nie całe ciepło generowane obecnie w wyniku spalania pochodzi z paliw kopalnych. Istnieją branże, w których spalane są biogeniczne odpadki z procesu produkcyjnego (np. kora w branży drzewnej, meblowej, a częściowo także w papierniczej) lub odpady przemysłowe (w przemyśle cementowym czy rafineryjnym), a nawet komunalne (w cementowniach). Spalanie materiałów i surowców biogenicznych jest często (w uproszczeniu) traktowane jako neutralne dla klimatu, ponieważ CO₂ uwolnione do atmosfery podczas ich spalania zostało wcześniej z niej pobrane w procesie wzrostu roślin (np. drzew).

Paliwa odpadowe **nie są neutralne klimatycznie**, jednak za ich dopuszczeniem do spalania przemawia fakt, że niezależnie o tego, czy byłyby spalane czy nie – i tak powstaną. Gaz koksowniczy lub wielkopieczowy będzie produkowany tak długo, jak długo będą produkowane koks i stal pierwotna w wielkich piecach. Nieunikniona jest też produkcja odpadów przemysłowych i komunalnych, choć UE dąży do ich redukcji poprzez zwiększanie poziomów segregacji i recyklingu.

Przyjęcie założenia, że te źródła energii są dopuszczalne i nie trzeba redukować ich zużycia poprzez elektryfikację, pozwala obniżyć średnie nakłady inwestycyjne na technologie elektryfikacyjne z 67 mld zł do 51 mld zł. W takim scenariuszu dodatkowe zużycie energii elektrycznej spada z 57 TWh do 38 TWh, co przekłada się na zmniejszenie średniej dodatkowej mocy z 9,8 GW do 6 GW.

Wykres 22. Potencjalne oszczędności energii elektrycznej, dodatkowej mocy oraz nakładów inwestycyjnych wynikające z braku konieczności elektryfikacji procesów przemysłowych zasilanych biomasą i odpadami



Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

[Przejdź do interaktywnego wykresu](#)

*Biomasa – biogaz, paliwa ciekłe z biomasy, paliwa odpadowe stałe roślinne i zwierzęce, torf i drewno.

** Paliwa odpadowe – gaz koksowniczy, gaz wielkopieczowy, paliwa odpadowe gazowe, odpady komunalne, odpady przemysłowe stałe i ciekłe.

26

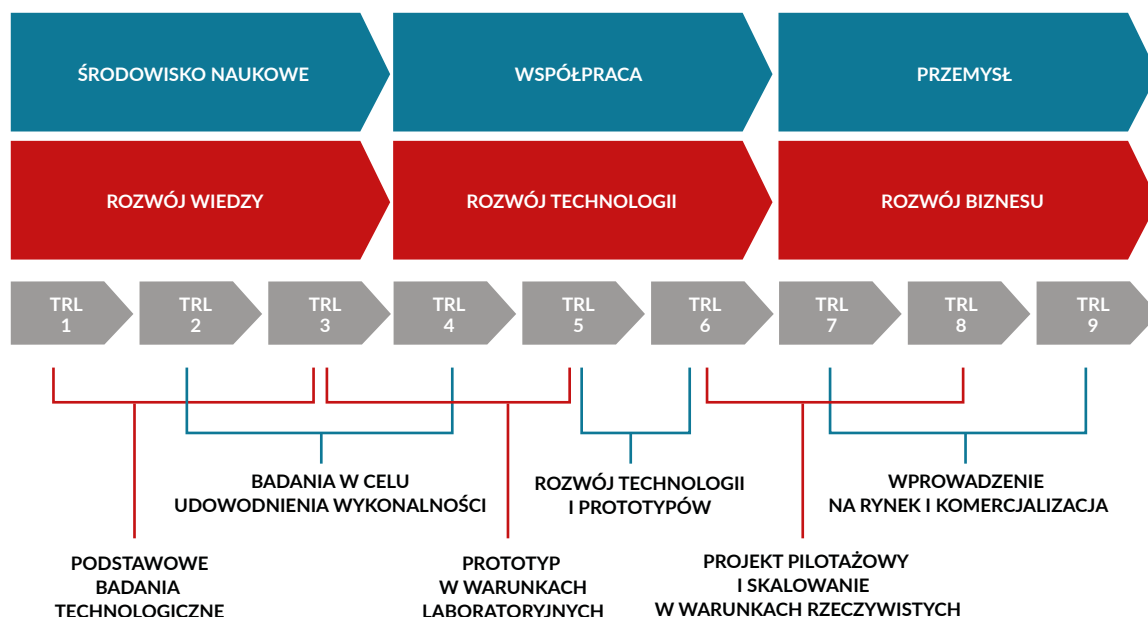
9. Technologie

Ten rozdział zawiera opisy możliwych do zastosowania technologii ogrzewania elektrycznego w procesach przemysłowych z uwzględnieniem potencjału ich zastosowania, przewag i ograniczeń. Głównym kryterium wyboru technologii był ich poziom gotowości technologicznej (TRL, ang. *Technology Readiness Level*), przedstawiony na rysunku 2. W analizie uwzględniono technologie o wysokim poziomie TRL wynoszącym 8–9 ze względu na udowodnioną skuteczność danej technologii w rzeczywistych warunkach operacyjnych lub demonstratorach.

W analizie skupiono się na technologiach, które są możliwe do zastosowania w przemyśle obecnie, należą do nich:

- 1) pompy ciepła,
- 2) kotły elektryczne,
- 3) ogrzewanie oporowe,
- 4) ogrzewanie indukcyjne,
- 5) elektryczne piece łukowe,
- 6) ogrzewanie podczerwienią,
- 7) ogrzewanie dielektryczne.

Rysunek 2. Poziom gotowości technologicznej (TRL)



Źródło: J. North, *What are TRLs? Technology Readiness Levels Explained*, The Big Bang Partnership, 2025, <https://bigbangpartnership.co.uk/what-are-trl-technology-readiness-levels-explained/>.

9.1. Pompy ciepła

27

Opis technologii

Pompa ciepła to urządzenie służące do wytwarzania ciepłej wody i pary. Działa na zasadzie transportu ciepła z otoczenia (lub z ciepła odpadowego, np. ciepłych ścieków przemysłowych) do instalacji grzewczej przy wykorzystaniu energii elektrycznej. Energia elektryczna zasila sprężarkę, która zwiększa ciśnienie i temperaturę czynnika chłodniczego w obiegu termodynamicznym, umożliwiając przekazanie ciepła do systemu grzewczego. Dzięki temu pompa dostarcza do systemu więcej ciepła niż zużywa energii elektrycznej (COP > 1).

Duże przemysłowe pompy ciepła różnią się od przydomowych nie tylko skalą. Ich ingerencja w system jest znacznie bardziej złożona, podczas gdy produkowane masowo pompy ciepła do zastosowań w budynkach są łatwe w instalacji. Nie ma uniwersalnej przemysłowej pompy ciepła – każde urządzenie musi być dostosowane do konkretnego procesu, który może mieć inne parametry (m.in. moc, temperaturę) w zależności od branży czy danej fabryki. Pompy ciepła różnią się również stosowanymi czynnikami chłodniczymi oraz różnorodnością typów (nie tylko sprężarkowe, jak w przydomowych zastosowaniach).

Zastosowanie

Pompy ciepła są obecnie używane przeważnie do ogrzewania hal i pomieszczeń lub produkowania ciepłej wody użytkowej. Presja na elektryfikację procesów przemysłowych spowodowała jednak rozwój technologii w kierunku wyższych temperatur – opracowane i komercyjnie dostępne są nowe typy pomp ciepła, sprężarek, czynników chłodniczych (np. amoniak, nadkrytyczne CO₂), czy układy, w których pracują pompy ciepła (np. kaskadowy). Najczęściej stosowane w przemyśle typy pomp ciepła wraz z maksymalnymi temperaturami odbioru przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Maksymalna temperatura odbioru dla różnych typów pomp ciepła

Typ pompy ciepła	Maks. temperatura deklarowana przez producentów (°C)	Temperatura na zasilaniu w istniejącej instalacji (°C)
Pompa ciepła z zamkniętą pętlą kompresji	165	138
MVR (mechaniczna rekompresja pary)	250	211
Transformator ciepła	230	185
Pompa ciepła Stirlinga	250	183
Pompa ciepła w obiegu Joule'a	150	b.d.

Źródło: IEA, *Annex 58, High-Temperature Heat Pumps, Task 1-Technologies*, 2023, <https://heatpumpingtechnologies.org/project58/task1/>.

Dzięki możliwości uzyskania wysokich temperatur przemysłowe pompy ciepła mogą znaleźć zastosowanie przy ogrzewaniu pomieszczeń oraz produkcji:

- żywności i napojów – np. pasteryzacja, suszenie (owoców, warzyw, ziół, mięsa, ryb), blanszowanie, sterylizacja, gotowanie, podgrzewanie, fermentacja, destylacja oraz koncentracja soków owocowych, mleka, serów i zagęszczanie produktów mlecznych,
- tekstyliów i odzieży – np. suszenie, barwienie, wykańczanie, pranie przemysłowe tekstyliów,
- drewna i korka – np. suszenie,
- papieru – np. suszenie papieru, podgrzewanie wody procesowej, przygotowanie masy papierniczej, produkcja papieru, produkcja pulpy,
- chemikaliów i wyrobów chemicznych – np. destylacja, suszenie, wytwarzanie pary o niskich parametrach, koncentracja chemikaliów,
- wyrobów mineralnych – np. suszenie ceramiki, utwardzanie cementu,
- samochodów, sprzętu transportowego, maszyn – np. galwanizacja, suszenie, mycie, przygotowanie powierzchni karoserii do suszenia.

28

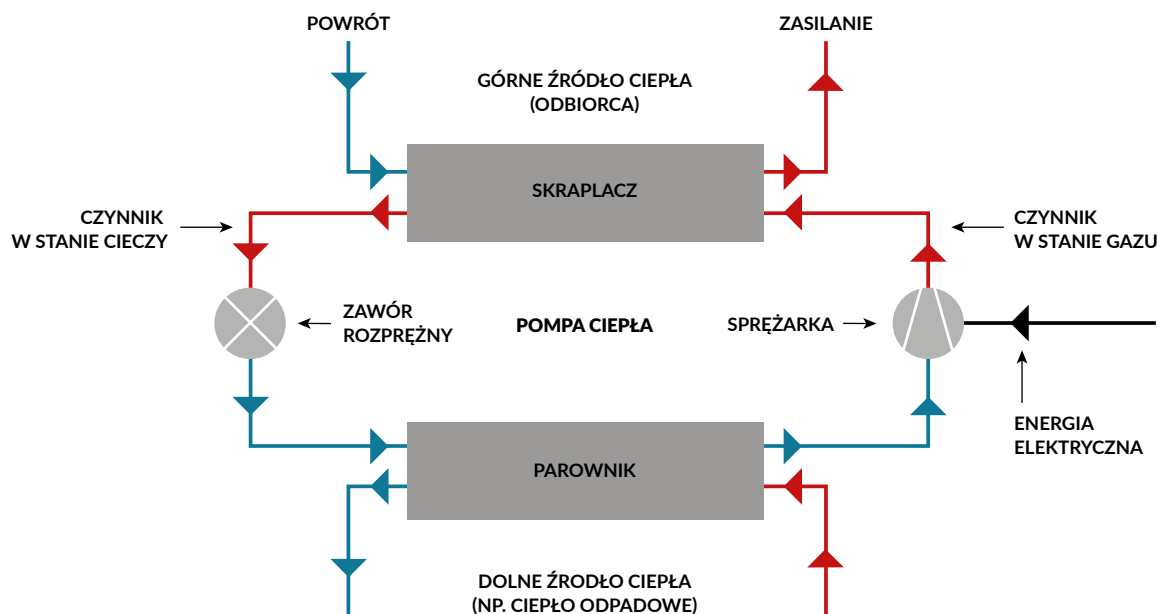
Zasada działania

Celem każdej pompy ciepła jest przeniesienie energii z dolnego źródła ciepła (o niskiej temperaturze, np. ciepła odpadowego) do górnego źródła ciepła (o wysokiej temperaturze, np. suszarki bębnowej).

Najbardziej typowa **sprężarkowa pompa ciepła** z zamkniętym obiegiem czynnika chłodniczego składa się z czterech głównych elementów: parownika, sprężarki, skraplacza i zaworu rozprężnego. W parowniku czynnik chłodniczy odparowuje dzięki ciepłu dostarczonemu z dolnego źródła ciepła, następnie jest sprężany, co powoduje wzrost jego ciśnienia i temperatury. Sprężarka zasilana jest energią elektryczną. W kolejnym kroku gaz skrapla się, oddając ciepło do górnego źródła ciepła (odbiorcy), po czym następuje jego rozprężanie, co powoduje obniżenie ciśnienia i ochłodzenie czynnika chłodniczego. Następnie cały cykl rozpoczyna się od nowa.

Dzięki takiej pracy pompa ciepła uzyskuje bardzo wysokie COP (2,7–5,4³⁰), czyli stosunek wytworzonego ciepła do dostarczonej energii elektrycznej. Pompa ciepła z zamkniętą pętlą kompresji uzyskuje obecnie maksymalną temperaturę na odbiorze 165°C. Możliwe jest połączenie wysokotemperaturowej pompy ciepła z systemem mechanicznej rekompresji pary (MVR) dla uzyskania wyższych temperatur (obecnie do 250°C).

Rysunek 3. Schemat działania standardowej sprężarkowej pompy ciepła



Źródło: KAPE i KE, *Dobre praktyki w MŚP. Pompa ciepła*, MKiŚ, 2020, <https://www.gov.pl/attachment/745fc284-3a61-435f-b491-f7aca8eb6163>.

Szczególnym przykładem zastosowania pompy ciepła jest zintegrowanie jej z procesem w taki sposób, że strona dolnego źródła ciepła odpowiada za schładzanie strumienia procesowego (np. chłodzenie pomieszczeń w chłodniach, w których przechowywane jest mięso), a strona górnego źródła ciepła dostarcza ciepło do procesu (np. podgrzewanie wody wykorzystywanej przy obróbce mięsa). Taka konfiguracja, pozwalająca na jednoczesne ogrzewanie i chłodzenie, sprzyja uzyskaniu wyższych wartości COP, a co za tym idzie – niższych kosztów eksploatacyjnych. Najczęściej takie zastosowanie pomp ciepła występuje w zakładach produkujących żywność lub napoje ze względu na występowanie jednocześnie potrzeby chłodzenia i ogrzewania.

29

Najwyższą temperaturę uzyskuje się przy zastosowaniu MVR (ang. *Mechanical Vapour Recompression*). W systemie z mechaniczną rekompresją para para pochodząca z procesu przemysłowego, zamiast być odprowadzona na zewnątrz, jest ponownie sprężana (stając się jednocześnie czynnikiem roboczym). Podnosi to jej ciśnienie i temperaturę, dzięki czemu para może być ponownie użyta w procesie. Efektywność systemów MVR jest bardzo wysoka (COP 3–30) ze względu na wyeliminowanie jednego lub dwóch wymienników ciepła (odpowiednio w układzie półotwartym lub otwartym) oraz niewielkie temperatury podnoszenia (para będąca źródłem ciepła odpadowego ma już na początku wysoką temperaturę). Systemy MVR znajdują najczęściej zastosowanie w przemyśle spożywczym, chemicznym czy papierniczym, w których para jest produktem ubocznym.

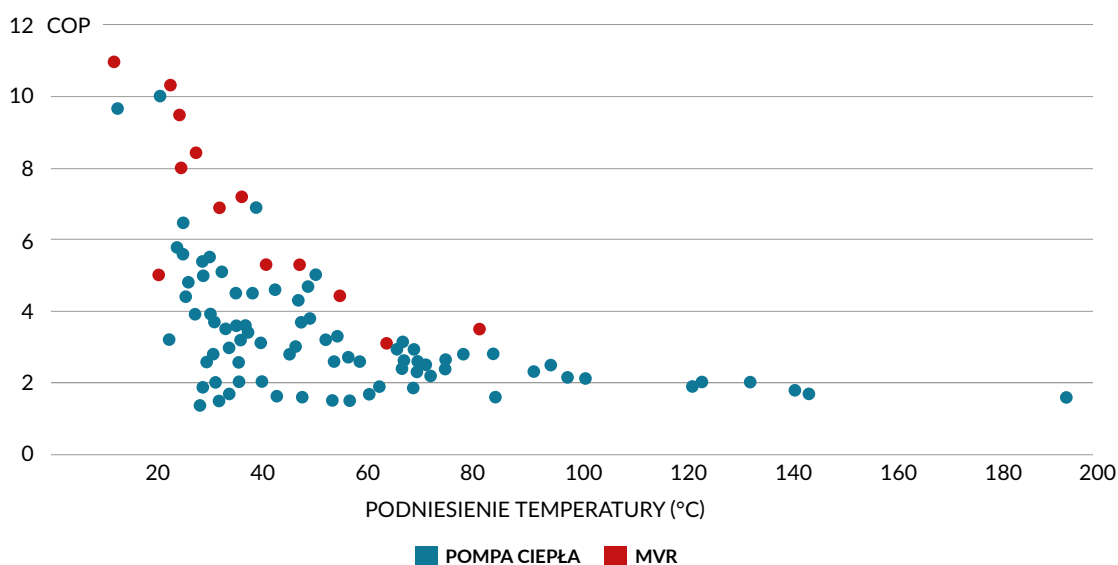
Poza pompami sprężarkowymi oraz MVR istnieją inne konstrukcje pomp ciepła. W zastosowaniach o bardzo dużej różnicy temperatur pomiędzy dolnym a górnym źródłem ciepła można wykorzystać **pompę ciepła o obiegu Joule'a**, w której standardowa sprężarka jest zastąpiona konstrukcją rotacyjną całej pompy, dzięki czemu to siła odśrodkowa zwiększa ciśnienie czynnika chłodniczego. Jeżeli wymagane podniesienie temperatury jest również wysokie (ok. 100°C), ale dodatkowo konieczne jest uzyskanie wysokiej temperatury na wylocie (ok. 250°C), wówczas można zastosować inny obieg termodynamiczny – Stirlinga (**pompa ciepła Stirlinga**).

Kolejnym wariantem konstrukcji pomp ciepła jest rezygnacja ze sprężarki na rzecz procesu sorpcji (pochłaniania jednej substancji przez inną). Ta modyfikacja, nazywana **transformatorem ciepła**, obniża zużycie energii elektrycznej za cenę niższego COP pompy (COP < 1). Jest to możliwe rozwiązanie przy dużych ilościach ciepła odpadowego.

Charakterystyka

Komercyjnie dostępne pompy ciepła osiągają obecnie temperaturę 165°C³¹. W najbliższej przyszłości urządzenia te mogą osiągnąć temperaturę 200°C, a w 2030 r. 300°C³². Rozwój pomp ciepła zależy głównie od znalezienia odpowiedniego czynnika chłodniczego, który spełnia wymagania dotyczące wysokich temperatur krytycznych (>170°C), bezpieczeństwa (nietoksyczność, niska łatwopalność), wpływu na środowisko³³ oraz wysokiej efektywności przy wysokich różnicach temperatur. Istotne jest także opracowanie odpowiednich materiałów do produkcji komponentów pomp ciepła, tak żeby mogły bezpiecznie i wydajnie pracować w warunkach wysokich temperatur i ciśnień.

Wykres 23. Zależność pomiędzy COP pomp ciepła a różnicą temperatur między górnym a dolnym źródłem ciepła



30

Źródło: IEA, *Annex 58, High-Temperature Heat Pumps...*, op.cit.

Przy wysokich temperaturach odbioru szczególnie ważne jest zachowanie wysokiej wydajności (COP) pompy ciepła. Jak przedstawia wykres 23, wydajność urządzenia w dużej mierze zależy od różnicy temperatur między dolnym a górnym źródłem ciepła. Z tego powodu bardzo ważne jest wykorzystanie ciepła odpadowego o jak najwyższej dostępnej w zakładzie temperaturze. Analogicznie, jeżeli możliwe jest obniżenie temperatury procesu kosztem wydłużenia czasu jego trwania, należy rozważyć takie rozwiązanie, wówczas pompa ciepła będzie działać z wyższym COP.

Integracja pompy ciepła z istniejącym systemem wymaga zatem dokładnej analizy danego procesu przemysłowego oraz starannego dostosowania systemu zarówno po stronie dolnego, jak i górnego źródła ciepła. Należy także przeanalizować sam proces pod względem jego efektywności oraz wymaganych temperatur. Instalacja pompy ciepła nie jest bowiem prostym wstawieniem urządzenia – jest raczej rozwiązaniem szytym na miarę, które może wymagać zmian w istniejącej infrastrukturze, m.in. dostosowania rurociągów, wymienników ciepła czy systemów sterowania.

31 Maksymalna temperatura dla standardowej sprężarkowej pompy ciepła z zamkniętym obiegiem czynnika chłodniczego.

32 Fraunhofer ISI, *Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU*, 2024, <https://www.agora-industry.org/publications/direct-electrification-of-industrial-process-heat>.

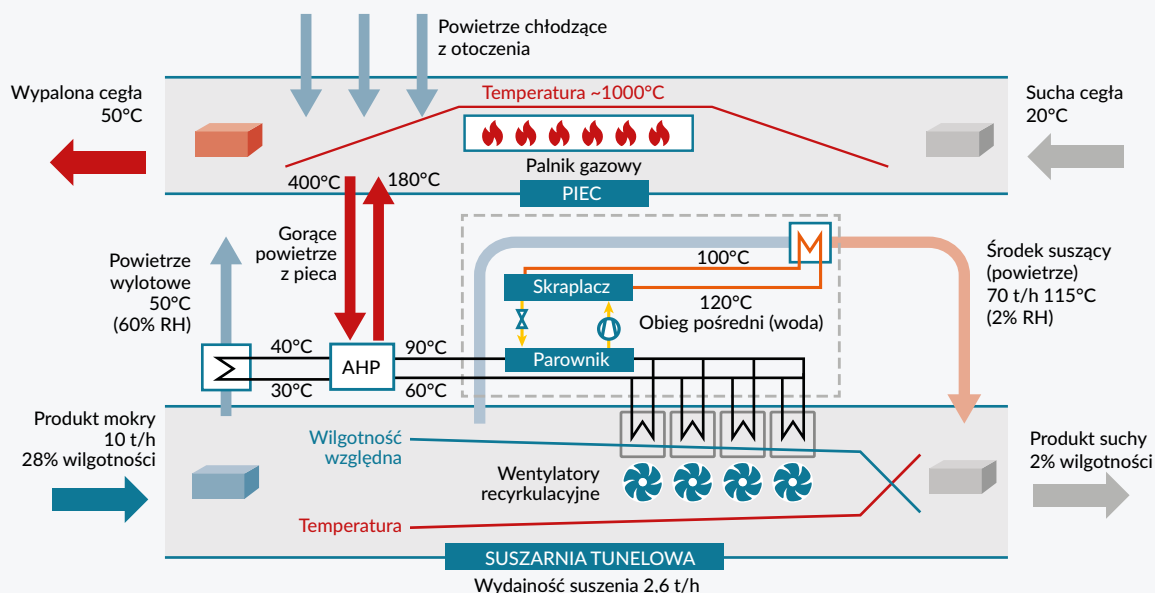
33 Niskie GWP (ang. *Global Warming Potential*) – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego oraz ODP (ang. *Ozone Depletion Potential*) – potencjał niszczenia ozonu.

Przykład

Wienerberger jest producentem cegieł i dachówek ceramicznych. Firma posiada ok. 200 suszarni cegieł w swoich zakładach produkcyjnych na całym świecie. W Uttendorf (Austria) powstał demonstrator, w którym suszenie z wykorzystaniem palnika na gaz ziemny zastąpiono pompą ciepła. W zakładzie zainstalowano pompę ciepła o mocy 400 kW i temperaturze odbioru ciepła 110–160°C³⁴. Demonstrator wykazał oszczędność energii sięgającą do 80% oraz redukcję emisji CO₂ o ok. 80%³⁵.

Proces suszenia cegieł zachodzi w suszarni tunelowej w sposób ciągły. Gorące powietrze, które przepływa w kierunku przeciwnym do przemieszczania się cegieł, osusza je, zmniejszając ich wilgotność z 28% do 2%. Powietrze to jest ogrzewane z wykorzystaniem ciepła odpadowego (ok. 90°C) pochodzącego z procesu suszenia i wypalania cegieł. Pompa ciepła w tym systemie jest wykorzystywana do wytwarzania gorącego powietrza (110–160°C) i kierowania go do strefy wylotowej suszarni tunelowej, gdzie wymagane są najwyższe temperatury. Pompa ciepła wykorzystuje także ciepło odpadowe jako dolne źródło ciepła (parownik).

Rysunek 4. Schemat suszarni cegieł wspomaganą pompą ciepła



31

Źródło: Wienerberger - Brick Industry, 2025, <https://dryficiency.eu/integration-demonstration/wienerberger-brick-industry>.

34 V. Wilk et al., DryFiciency. Waste Heat Recovery in Industrial Drying Processes. Integrated Heat Pump Systems, 2019, www.dryficiency.eu.

35 Wienerberger - Brick Industry, 2025, <https://dryficiency.eu/integration-demonstration/wienerberger-brick-industry>.

9.2. Kotły elektryczne

Opis technologii

Kotły elektryczne służą do wytwarzania gorącej wody i pary. Technologia ta jest dojrzała i może być alternatywą dla obecnie wykorzystywanych kotłów opalanych paliwami kopalnymi. Zaletą tego rozwiązania jest nieco wyższa sprawność – 99% w porównaniu z ok. 95%³⁶ dla konwencjonalnych kotłów gazowych. Różnica ta wynika z mniejszych strat ciepła związanych z wymiennikami ciepła i gazami odlotowymi.

Zastosowanie

W przemyśle kotły elektryczne mogą być wykorzystywane przy produkcji pary powyżej 200°C dla branż:

- chemicznej – np. para wykorzystywana do produkcji sody, kwasu adypinowego,
- metali i wyrobów metalowych – np. w wielkim piecu, koksowni, do procesów czyszczenia, wyżarzania, obróbki wstępnej w zakładach trawienia metali,
- wyrobów mineralnych – np. do suszenia ceramiki,
- drewna i korka – np. do prasy do płyt pilśniowych.

Ze względu na znacznie wyższą sprawność gorąca woda i para wodna o niższych temperaturach (poniżej 200°C) mogą zostać wygenerowane przez pompę ciepła.

Zasada działania

Można wyróżnić dwa typy kotłów elektrycznych:

1. **Kotły rezystancyjne** – energia elektryczna przepływa przez element grzewczy, który nagrzewając się, przekazuje ciepło do wody (jak w czajniku elektrycznym).
2. **Kotły elektrodowe** – energia elektryczna przepływa bezpośrednio przez wodę, która znajduje się pomiędzy elektrodami, co powoduje nagrzanie się jej. Istotne jest odpowiednie przygotowanie wody do tego procesu, a najważniejszym parametrem, który jest stale monitorowany podczas pracy kotła, jest przewodność wody. Ilość wydzielonego ciepła oraz sprawność kotła zależą zatem również od jej parametrów.

Charakterystyka

Główną zaletą kotłów elektrycznych jest łatwość podłączenia ich do istniejącego systemu oraz możliwość zastosowania do wysokotemperaturowych procesów (powyżej 200°C). Największą barierą dla tej technologii są natomiast koszty eksploatacyjne – wysoka cena energii elektrycznej w stosunku do ceny gazu ziemnego.

Przykład

Zakład produkcyjny PepsiCo na Dolnym Śląsku (Święte k. Środy Śląskiej) specjalizuje się w produkcji chipsów marki Lay's oraz nachosów Doritos (do 130 ton na dobę). Jednym z kotłów zasilających proces technologiczny w parę jest elektryczny kocioł parowy o wydajności 5 ton pary wodnej na godzinę i ciśnieniu 10 bar. Kocioł o mocy 3,6 MWe i sprawności 99,4%³⁷ korzysta z energii elektrycznej pochodzącej z paneli fotowoltaicznych, a w przyszłości rozważane jest także zasilanie kotła z elektrowni wiatrowej.

36 C. Bedocchi, G. Cassetti, *Electrification of Industrial Heat: The key to a sustainable and competitive industry*, ECCO, 2025, <https://eccoclimate.org/electrification-of-industrial-heat-the-key-to-a-sustainable-and-competitive-industry/>.

37 LOOS BOSCH Kotły Przemysłowe, *Elektryczny kocioł parowy LOOS Bosch ELSB w nowoczesnym zakładzie PepsiCo*, 2024, <https://bosch-industrial.pl/o-firmie/referencje/>.

9.3. Ogrzewanie oporowe

Opis technologii

Ogrzewanie oporowe jest technologią o największej różnorodności zastosowań. Znajduje zastosowanie zarówno w procesach niskotemperaturowych (np. przy gotowaniu produktów spożywczych, temp. 80°C), jak i w procesach wysokotemperaturowych (np. przy topieniu metali, temp. ponad 1000°C). Ogrzewanie oporowe jest technologią dojrzałą, która może być alternatywą dla obecnych instalacji opalanych paliwami kopalnymi. W przemyśle obecnie wykorzystywane są elektryczne piece, piekarniki i suszarnie.

Zastosowanie

Ogrzewanie oporowe może znaleźć zastosowanie przy produkcji:

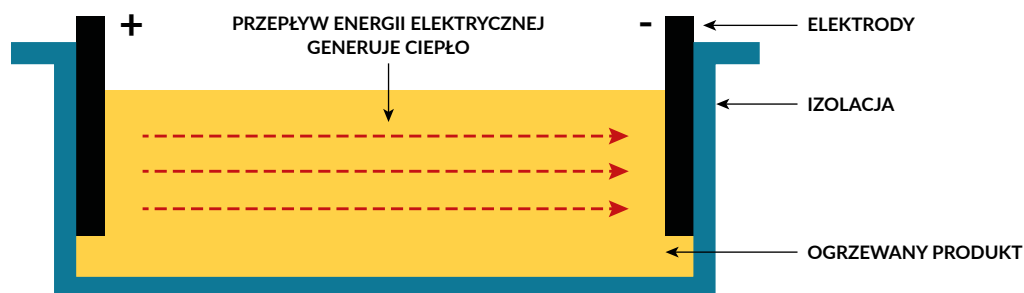
- metali i wyrobów metalowych – np. topienie, odlewanie, wyżarzanie, obróbka cieplna,
- wyrobów mineralnych (szkło) – np. topienie, wyżarzanie,
- samochodów, sprzętu transportowego, maszyn – np. odlewanie, obróbka cieplna, spawanie,
- żywności – np. pieczenie, suszenie, smażenie, gotowanie, sterylizacja,
- tekstyliów – np. suszenie.

Zasada działania

Ogrzewanie oporowe polega na wytworzeniu ciepła poprzez przepływ energii elektrycznej przez element grzewczy o dużym oporze elektrycznym. Wyróżnia się dwa typy ogrzewania oporowego:

- 1) **bezpośrednie** – element grzewczy pełni jednocześnie funkcję ogrzewanego materiału, materiał ten musi być przewodnikiem elektrycznym (np. roztopione szkło, metale, roztwór soli, woda, płynne produkty spożywcze, wilgotny beton) i pozostawać w kontakcie z elektrodami,

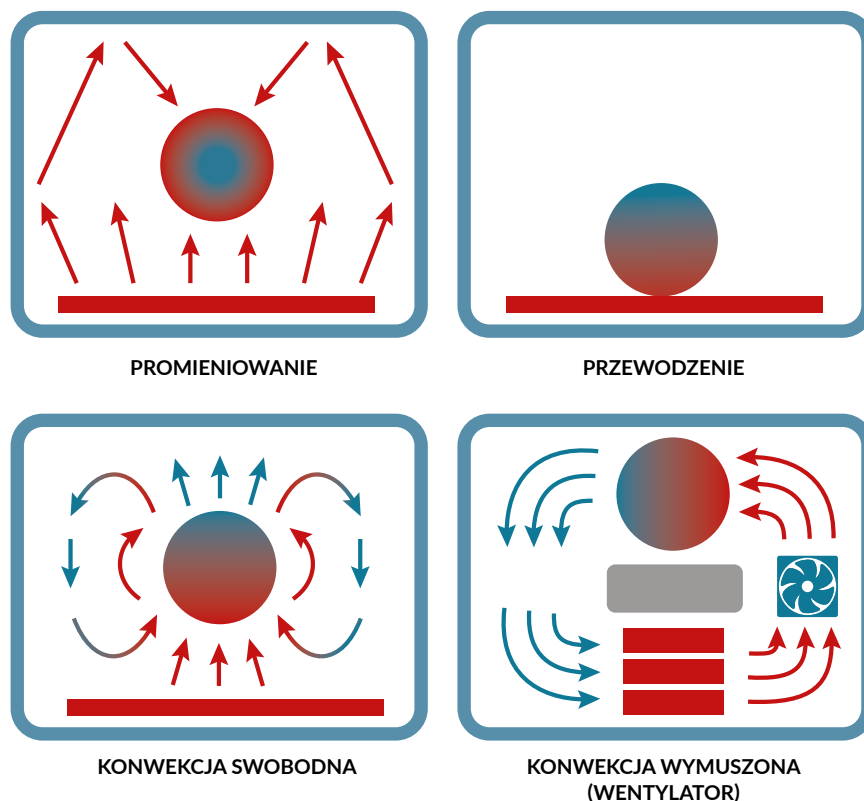
Rysunek 5. Schemat ogrzewania oporowego bezpośredniego



Źródło: EECA, *Direct Process Heating Ohmic Direct Resistance Heating*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Direct-process-heating-ohmic-direct-resistance-heating.pdf>.

- 2) **pośrednie** – element grzewczy przekazuje ciepło do materiału docelowego przez otaczające je medium (np. powietrze) poprzez przewodzenie, konwekcję, promieniowanie lub kombinację tych procesów; proces ten zazwyczaj odbywa się w dobrze izolowanej obudowie, co minimalizuje straty (np. piekarnik).

Rynek 6. Schemat ogrzewania oporowego pośredniego poprzez promieniowanie, przewodzenie i konwekcję



34

Źródło: EECA, *Indirect Electric Resistance Process Heating. Conduction, Convection & Radiation Electric Heaters*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Indirect-electric-resistance-process-heating-conduction-convection-radiation-electric-heaters.pdf>.

Charakterystyka

Ogrzewanie oporowe oferuje wysoką sprawność, precyzyjną kontrolę temperatury, szybkie nagrzewanie, niskie wymagania konserwacyjne oraz niskie koszty utrzymania. Ograniczeniem dla zastosowania ogrzewania oporowego pośredniego jest gęstość mocy (ilość mocy cieplnej generowanej przez element oporowy na jednostkę powierzchni tego elementu), którą może osiągnąć element grzewczy (80 kW/m^2)³⁸. Dla niektórych zastosowań (np. spiekanie cementu, ponowne nagrzewanie stali), w przypadku których powierzchnia obecnych pieców jest ograniczona, występują trudności z uzyskaniem wystarczającej gęstości mocy. Kolejnym czynnikiem ograniczającym jest maksymalna osiągalna temperatura ograniczona właściwościami materiału, z którego wykonano element grzewczy (obecnie 1850°C bez atmosfery gazu obojętnego³⁹) oraz materiał ogniotrwały (temperatura topnienia lub degradacji materiału ogniotrwałego, z którego zbudowany jest piec). Obecnie trwają prace badawcze nad materiałami elementów grzewczych, które mogą uzyskiwać wyższe temperatury i wyższe gęstości mocy. Opracowywane są także systemy z zewnętrznym nagrzewaniem w celu rozwiązania problemu z ograniczoną gęstością mocy⁴⁰.

38 Fraunhofer ISI, *Direct electrification of industrial process heat*, op.cit.

39 Środowisko gazu obojętnego ogranicza utlenianie i minimalizuje degradację elementu grzejnego, przedłużając jego żywotność.

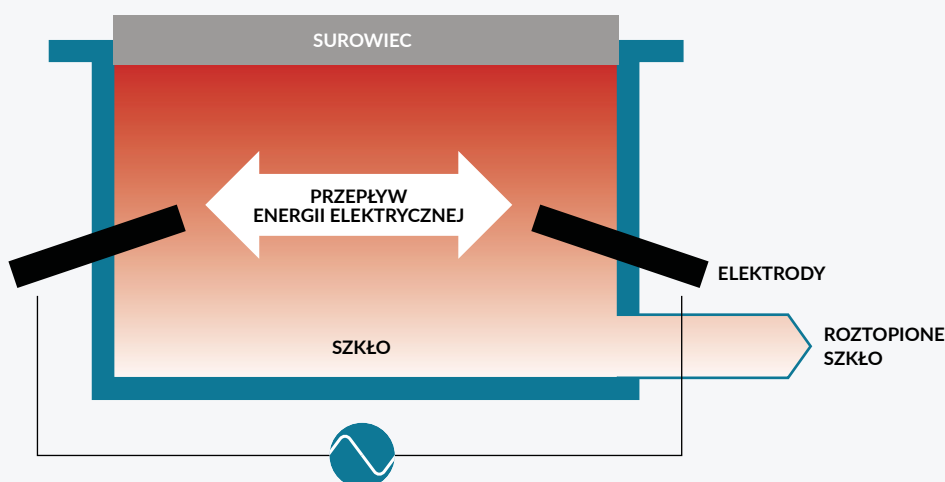
40 Fraunhofer ISI, *Direct electrification of industrial process heat*, op.cit.

Przykład

Verallia to trzeci co do wielkości producent opakowań szklanych na świecie. W 2024 r. w zakładzie w Cognac we Francji został zainstalowany elektryczny piec do topienia szkła o maksymalnej wydajności 180 ton szkła dziennie (300 tys. butelek) i powierzchni 75 m², zastępując piec opalany gazem ziemnym. Dzięki wymianie pieca możliwe stało się ograniczenie emisji CO₂ o 60% (pozostałe emisje pochodzą z reakcji topienia, stanowiąc emisje procesowe). Standardowy piec do produkcji opakowań szklanych zasilany gazem ziemnym zużywa 4,5 GJ/t, podczas gdy piec elektryczny zużywa o 29% mniej energii – 3,2 GJ/t⁴¹.

W zainstalowanym piecu ciepło do topienia pochodzi głównie z zanurzonych elektrod, a gaz używany jest jedynie do wstępnego rozgrzewania pieca lub jako awaryjne źródło ciepła. Piec pracuje w systemie *cold top*, w którym zimny surowiec jest równomiernie podawany na górną powierzchnię topniejącego szkła, tworząc izolującą warstwę. Proces załadunku wsadu, topienia, klarowania i pobierania gotowego szkła zachodzi w jednej pionowej sekwencji. Szkło pobierane jest u podstawy zbiornika.

Rysunek 7. Schemat elektrycznego pieca do topienia szkła



Źródło: S. Silva, *Electric Melting - Growing capabilities. Where is the limit?*, 2025, https://cdn.ymaws.com/sgt.org/resource/resmgr/furnacesolutions/fs19-2025/2025_06_04_furnace_solutions.pdf.

9.4. Ogrzewanie indukcyjne

Opis technologii

Ogrzewanie indukcyjne to dojrzała technologia wykorzystywana głównie do topienia lub nagrzewania metali. W systemach używających tej technologii ciepło jest generowane bezpośrednio wewnątrz podgrzewanego materiału, co minimalizuje straty. Dzięki temu ogrzewanie indukcyjne jest znacznie bardziej efektywne energetycznie od pieców gazowych. Przykładem może być instalacja kucia na gorąco kęsów metalowych, której sprawność ogrzewania przy użyciu pieca gazowego wynosi 15%, a ogrzewania indukcyjnego 60%⁴².

Zastosowanie

W przemyśle ogrzewanie indukcyjne może znaleźć zastosowanie przy produkcji:

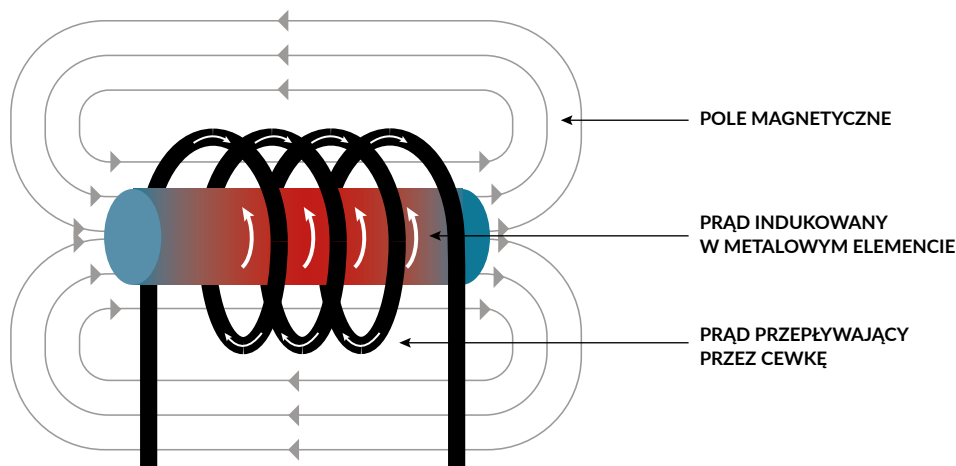
- 1) metali i wyrobów metalowych – rafinacja pozapiecowa, odlewanie, walcowanie, końcowa obróbka cieplna (np. wyżarzanie), topienie,
- 2) samochodów, sprzętu transportowego i maszyn – np. odlewanie, obróbka cieplna, spawanie.

Zasada działania

Ogrzewanie indukcyjne działa na zasadzie indukcji elektromagnetycznej. Prąd zmienny przepływający przez cewkę indukcyjną generuje zmienne pole magnetyczne. Pole to indukuje prądy wirowe w umieszczonym wewnątrz cewki materiale przewodzącym (zwykle metalu), co powoduje jego nagrzewanie. Podczas nagrzewania indukcyjnego materiałów ferromagnetycznych (np. żelazo, stal, nikiel, kobalt) ciepło dodatkowo powstaje w wyniku strat histerezy⁴³.

36

Rysunek 8. Schemat ogrzewania indukcyjnego



Źródło: Beyond Zero Emissions, *Zero Carbon Industry Plan. Electrifying Industry*, 2018, <https://www.bze.org.au/research/report/electrifying-industry>.

42 CEATI, *Electrotechnologies. Energy Efficiency Reference Guide for Small to Medium Industries*, 2007, https://www.hydroone.com/savingmoneyandenergy_/energysavingsforbusiness_/Documents/Electrotechnologies_Reference_Guide.pdf.

43 Przykładając zmienne pole magnetyczne do materiału, wywołujemy jego magnesowanie i rozmagnesowywanie. Straty histerezy powstają, gdy domeny magnetyczne materiału wielokrotnie ustawiają się zgodnie ze zmiennym polem magnetycznym. Ponieważ proces ten nie jest idealnie odwracalny, część energii zamienia się w ciepło, powodując nagrzewanie materiału.

Charakterystyka

Główną zaletą ogrzewania indukcyjnego jest wytwarzanie ciepła bezpośrednio w materiale, co znacznie poprawia sprawność procesu. Inne plusy tej technologii to szybkie osiąganie pełnej mocy (nie wymaga wcześniejszego rozgrzewania), co skraca proces oraz daje możliwość precyzyjnej kontroli temperatury, pozwalając osiągnąć lepszą jakość produktu.

Dodatkowo przy zastosowaniu pieców gazowych powierzchnia metalu utlenia się. Prowadzi to do strat materiałowych na poziomie 3–5% – wykorzystanie indukcji pozwala na zmniejszenie tych strat do 1%. Ogrzewanie indukcyjne jest ograniczone do materiałów przewodzących, a jego efektywność zależy od geometrii (technologia ta jest trudniejsza do zastosowania dla elementów o nieregularnych kształtach) i właściwości magnetycznych materiału.

Przykład

Producent łożysk kolejowych w USA rozważał zwiększenie produkcji w swoim zakładzie ze względu na zwiększone zapotrzebowanie, co oznaczało konieczność wzrostu zdolności grzewczych instalacji. Działające w zakładzie piece gazowe generowały wysokie koszty energii i utrzymania, dlatego rozważano zastosowanie ogrzewania indukcyjnego jako alternatywy.

Zainstalowano pięć nowych systemów indukcyjnych o mocy 2500 kW każdy. Inwestycja przyniosła oszczędności w wysokości 25–30%⁴⁴ na tonę produktu. Dodatkowo zmniejszyły się straty materiałowe (wynikające z utleniania powierzchni metali), koszty utrzymania ruchu w zakładzie produkcyjnym (serwisu, naprawy i konserwacji urządzeń) oraz zapotrzebowanie na pracę operacyjną (szybszy i bardziej zautomatyzowany proces).

9.5. Elektryczne piece łukowe

Opis technologii

Elektryczne piece łukowe (EAF, ang. *Electric Arc Furnaces*) to dojrzała technologia, która wykorzystuje energię elektryczną do topienia metali. Jest ona najczęściej stosowana do produkcji stali wtórnej powstającej ze złomu, ale może również być wykorzystywana do topienia innych metali.

Za pomocą elektrycznych pieców łukowych nie można w pełni zdekarbonizować produkcji stali, mimo że powstająca w tej technologii stal może być wytworzona niemal bezemisyjnie. Na przeszkodzie stoi fakt, że proces wtórny nie jest w stanie zagwarantować odpowiednich parametrów jakościowych stali ze względu na zanieczyszczenia w złomie (zwłaszcza miedziane). Z tego powodu w opracowaniu nie uwzględniono elektryfikacji produkcji stali pierwotnej (czyli stali produkowanej w wielkim piecu z rudy żelaza) poprzez wykorzystanie elektrycznego pieca łukowego do przetapiania złomu.

Zastosowanie

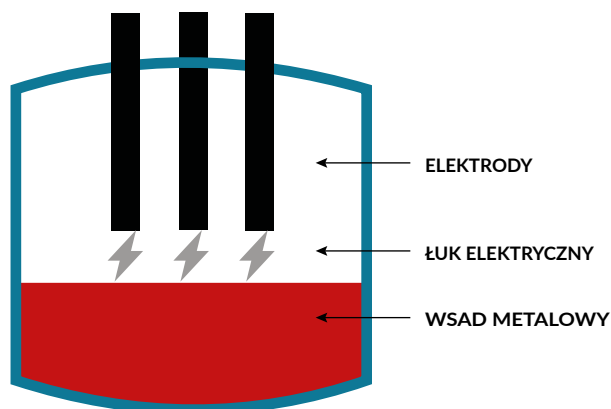
W przemyśle elektryczne piece łukowe mogą znaleźć zastosowanie przy produkcji metali i wyrobów metalowych – m.in. przy topieniu i przetapianiu metali nieżelaznych, takich jak miedź lub aluminium. W przypadku metali nieżelaznych wykorzystanie EAF jest mniej powszechne niż dla stali, ponieważ stosowane mogą być też inne technologie, takie jak piece indukcyjne.

Zasada działania

W piecach elektrycznych źródłem ciepła jest łuk elektryczny, który powstaje między grafitową elektrodą a metalowym wsadem lub między elektrodami. Najczęściej stosowane są piece łukowe trójfazowe z łukiem elektrycznym między elektrodą a wsadem. W trakcie procesu grafitowa elektroda zużywa się, generując niewielką ilość emisji procesowych.

38

Rysunek 9. Schemat elektrycznego pieca łukowego



Źródło: *Beyond Zero Emissions, Zero Carbon Industry Plan... op.cit.*

Charakterystyka

Elektryczne piece łukowe to technologia szeroko stosowana w przemyśle hutniczym, pozwalająca na szybkie topienie metali. Charakteryzują ją:

- wysoka temperatura pracy,
- wysoka osiągalna moc,
- elastyczna praca,
- wysoka wydajność grzewcza.

Główną wadą tej technologii jest wspomniane zużycie elektrod, które wymagają częstej wymiany. Dodatkowo, mimo że proces jest elektryczny, generuje on procesowe emisje CO₂ ze względu na użycie elektrod grafitowych i dodatków węglowych.

Przykład

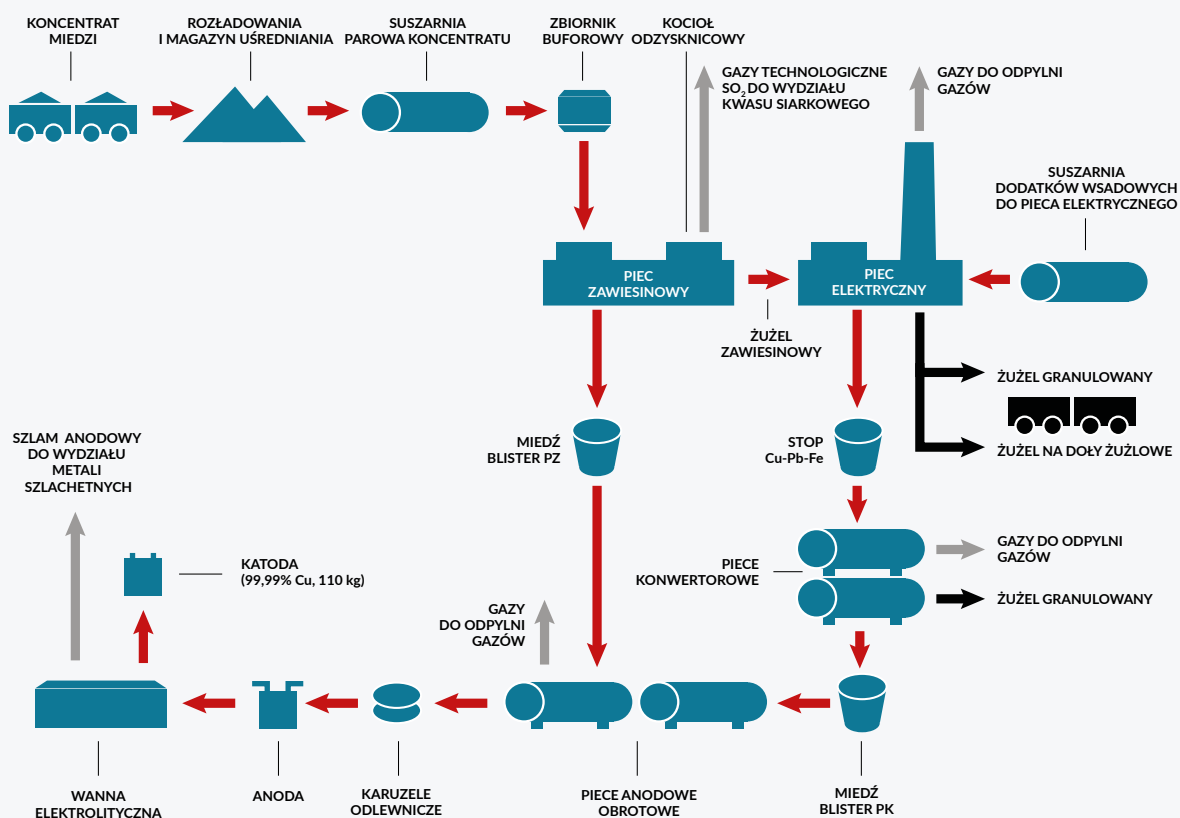
W 2016 r. KGHM uruchomił największą na świecie instalację pieca zawieszinowego i pieca elektrycznego do produkcji miedzi w Hucie Miedzi „Głogów I”. Obecnie proces produkcyjny zaczyna się tam od przygotowania wsadu polegającego na uśrednianiu i suszeniu mieszanki koncentratów miedzi. Tak przygotowany materiał trafia do pieca zawieszinowego, w którym powstają miedź blister o zawartości ok. 98,5% Cu oraz żużel zawieszinowy.

Żużel zawieszinowy jest kierowany do elektrycznego pieca łukowego w celu odzysku miedzi. Następnie ze stopu miedzi, ołowiu i żelaza produkowana jest miedź blister w piecach konwertorowych.

Miedź blister z pieca zawieszinowego i konwertorowego poddawana jest rafinacji. W piecach anodowych obrotowych usuwane są zanieczyszczenia, a następnie metal jest odlewany w postaci anod. Ostatnim etapem jest elektrorafinacja, podczas której miedź anodowa ulega roztwarzaniu w elektrolicie i osadza się na podkładce katodowej. W ten sposób powstają katody miedziane o zawartości 99,99% Cu. W tym procesie powstają także szlamy anodowe, które są surowcem do produkcji metali szlachetnych.

Katoda miedziana jest produktem finalnym lub przetwarzanym do innych produktów w walcowni⁴⁵.

Rysunek 10. Technologia stosowana w Hucie Miedzi „Głogów I” od 2016 r.



39

Źródło: R. Stach, *Dzień Analityka* - prezentacja, Lubin 12-14 lutego 2019 r., https://kgm.com/sites/default/files/kgm_prezentacja_da_2019.pdf.

9.6. Ogrzewanie podczerwienią

Opis technologii

Systemy z ogrzewaniem podczerwienią emitują promieniowanie podczerwone, które bezpośrednio ogrzewa obiekt, a nie powietrze wokół niego (jak to ma miejsce w konwekcyjnych piecach zasilanych gazem). Czyni to tę technologię bardzo dobrą alternatywą dla obecnych systemów opalanych paliwami kopalnymi. Sprawdza się ona doskonale przy ogrzewaniu powierzchni.

Zastosowanie

Ogrzewanie podczerwienią może być użyte przy produkcji:

- żywności i napojów – np. suszenie, pieczenie, opiekanie, grillowanie, pasteryzacja, zagęszczanie, sterylizacja,
- wyrobów mineralnych (ceramiki) – np. suszenie,
- tekstyliów – np. suszenie, utrwalać barwników, powlekanie,
- samochodów – np. suszenie umytych części, suszenie farb i lakierów, powierzchniowe podgrzewanie form, utwardzanie powłok lakierniczych,
- drewna – np. suszenie, laminowanie.

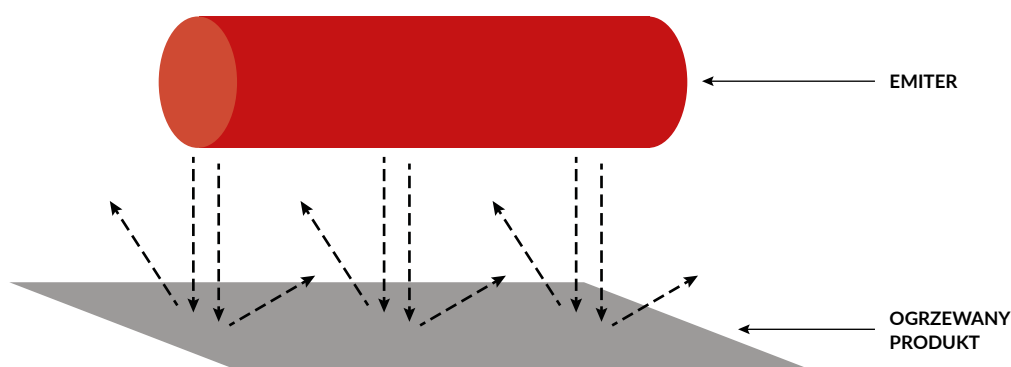
Zasada działania

System z ogrzewaniem podczerwienią zawiera emiter, który jest podgrzewany do wysokich temperatur za pomocą energii elektrycznej i emituje promieniowanie podczerwone. Najczęściej emiter jest wykonany z niklochromu lub wolframu. Promieniowanie podczerwone bezpośrednio ogrzewa powierzchnię materiału docelowego, a następnie ciepło przenika dalej w głąb materiału za pomocą przewodzenia.

40

Sprawność systemu z ogrzewaniem podczerwonym zależy od tego, jaka część promieniowania zostaje pochłonięta przez ogrzewany materiał. Straty mogą wystąpić przy pochłanianiu promieniowania przez powietrze znajdujące się pomiędzy emitorem a materiałem oraz przez odbicie promieniowania przez ogrzewany materiał.

Rysunek 11. Schemat pracy systemu z ogrzewaniem podczerwienią



Źródło: CEATI, *Electrotechnologies. Energy Efficiency Reference Guide For Small to Medium Industries*, 2007, https://www.hydroone.com/savingmoneyandenergy/_energysavingsforbusiness_/Documents/Electrotechnologies_Reference_Guide.pdf.

Charakterystyka

Systemy z ogrzewaniem podczerwienią najlepiej sprawdzą się do ogrzewania powierzchni elementów o prostej geometrii i płaskiej powierzchni (np. elementy karoserii samochodów). Ich istotną zaletą jest to, że mogą pracować przy niższych temperaturach niż system z piecem gazowym. Wynika to z faktu, że systemy z piecem gazowym ogrzewają powietrze wokół materiału do temperatury wyższej niż wymagana docelowa temperatura ogrzewanego

materiału, a ogrzewanie podczerwienią ogrzewa materiał bezpośrednio. W efekcie czas obróbki przy zastosowaniu podczerwieni jest znacznie krótszy, a sprawność procesu wyższa w porównaniu z piecami gazowymi.

Skuteczność ogrzewania podczerwienią zależy od kształtu obiektu i jego zdolności do absorpcji promieniowania podczerwonego (np. koloru, chropowatości). Niektóre materiały mogą odbijać promieniowanie podczerwone, co zmniejsza efektywność nagrzewania. Ponadto w przypadku elementów o nieregularnych kształtach może dochodzić do nierównomiernego nagrzewania.

Przykład

Zakład Queen City Forging z Ohio (USA) zajmuje się produkcją elementów dla sektora transportowego i rolniczego. Jednym z procesów w ramach linii produkcyjnej jest nagrzewanie aluminiowych wlewk do temperatury 425°C przed procesem kucia.

Firma postanowiła przejść z opalanych gazem pieców konwekcyjnych na ogrzewanie podczerwienią. Inwestycja ta przyczyniła się do zmniejszenia zużycia energii o 65% (968 kWh/t – piec gazowy, 323 kWh/t – podczerwień), oszczędności kosztów na poziomie 40–50%, skrócenia czasu nagrzewania (z 6 godzin do 18 minut), skrócenia czasu obróbki cieplnej (z 10 godzin do 1 godziny)⁴⁶ oraz wzrostu jakości produktu.

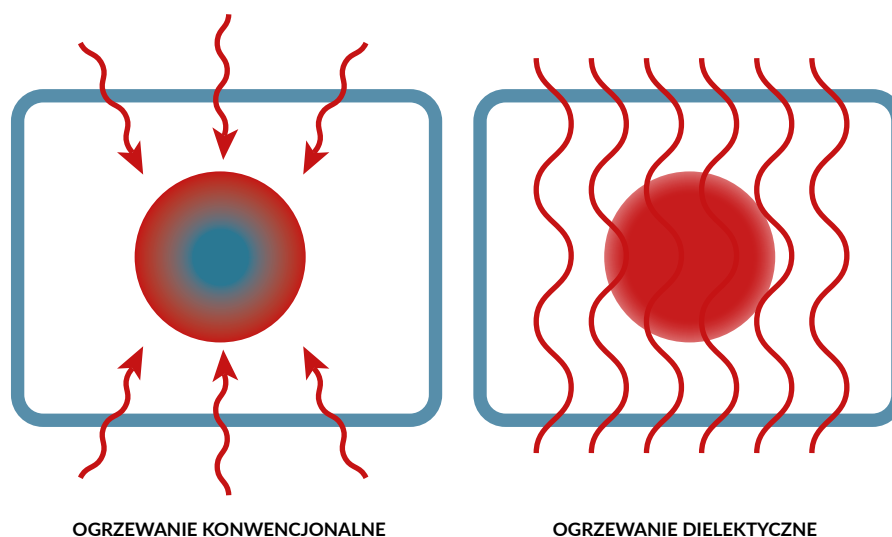
9.7. Ogrzewanie dielektryczne

Opis technologii

Ogrzewanie dielektryczne to technologia stosowana w przemyśle od lat 40. XX w. i posiada potencjał do szerszego stosowania. Jest to bardzo dobra alternatywa dla systemów opalanych paliwami kopalnymi ze względu na zdolność do bezpośredniego i natychmiastowego nagrzewania wnętrza materiałów, co jest niemożliwe do osiągnięcia w technologiach konwencjonalnych, które ogrzewają materiał poprzez przenikanie ciepła od powierzchni do wnętrza.

41

Rysunek 12. Porównanie ogrzewania konwencjonalnego z dielektrycznym



Źródło: Beyond Zero Emissions, *Zero Carbon Industry Plan...* op.cit.

Zastosowanie

Ogrzewanie dielektryczne najczęściej znajduje zastosowanie przy suszeniu i odparowywaniu wody ze względu na to, że woda doskonale pochłania energię mikrofal i fal radiowych. Może być wykorzystane przy produkcji:

- żywności i napojów – np. suszenie, pieczenie, gotowanie, pasteryzacja, rozmrażanie, sterylizacja,
- wyrobów mineralnych (ceramika) – np. suszenie,
- tekstyliów – np. suszenie i utwardzanie powłok,
- samochodów – np. suszenie i utwardzanie powłok na plastikowych częściach,
- drewna – np. suszenie, utwardzanie klejów.

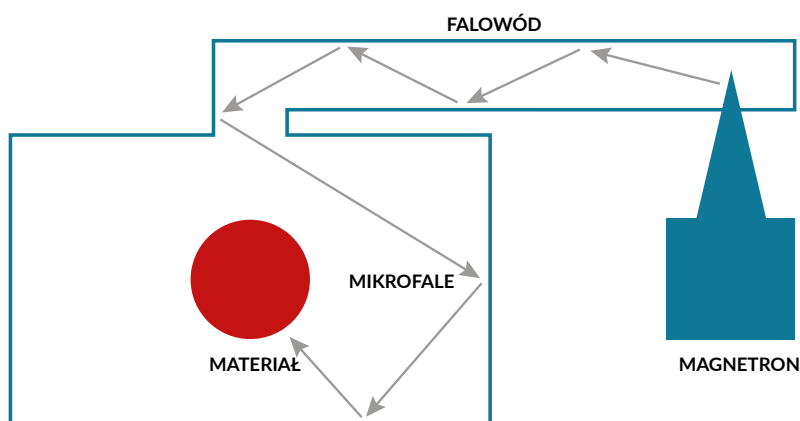
Technologia ta jest stosowana komercyjnie dla nisko- i średniotemperaturowych procesów, ale ma także duży potencjał do dalszego rozwoju w nowych zastosowaniach oraz przy wyższych temperaturach. Przykładem jest produkcja włókien węglowych z wykorzystaniem plazmy mikrofalowej (temperatura procesu 1000–1500°C)⁴⁷ oraz projekt DAPHNE⁴⁸, którego celem było zastąpienie tradycyjnego ogrzewania poprzez wysokotemperaturowe ogrzewanie mikrofalowe dla ceramiki (topienie w temperaturze 1300°C), cementu (kalcynacja i spiekanie klinkieru w temperaturach 1350–1400°C) i szkła (topienie w temperaturze 1250°C). Obecnie te rozwiązania mają niską gotowość technologiczną (TRL 6)⁴⁹.

Zasada działania

W systemach z ogrzewaniem dielektrycznym materiał przeznaczony do podgrzewania jest umieszczany w polu elektromagnetycznym o wysokiej częstotliwości (mikrofałe: 900–3000 MHz, fale radiowe: 10–100 MHz). Zmienne pole elektryczne oddziałuje na cząstki polarne w materiale (dipole, takie jak woda), które chcą się ustawić zgodnie z jego obecnym kierunkiem. Pole to zmienia swój kierunek, co powoduje gwałtowne rotacje cząstek. To tarcie (ruch) względem innych cząstek generuje ciepło w całej objętości materiału.

Mikrofałe zazwyczaj są generowane za pomocą magnetronu, a następnie przesyłane do materiału docelowego za pomocą falowodu. Ogrzewany materiał znajduje się w komorze z metalowymi, refleksyjnymi ścianami.

Rysunek 13. Schemat pracy ogrzewania mikrofalowego



Źródło: EECA, *Direct Process Heating. Microwave and Radio Frequency*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Direct-Process-Heating-microwave-radio-frequency.pdf>.

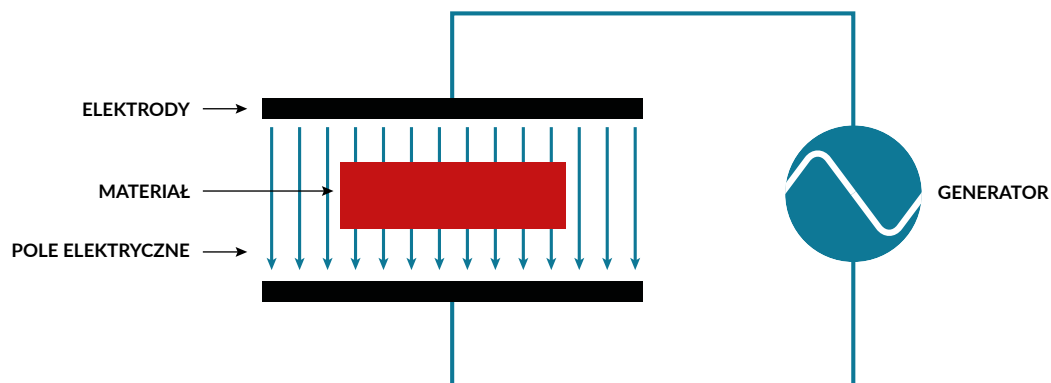
47 Projekt DAPHNE, *Adaptive production systems and measurement and control equipment for optimal energy consumption and near-to-zero emissions in manufacturing processes*, 2015, <https://cordis.europa.eu/project/id/314636/reporting>.

48 European Commission, *Development of Adaptive Production systems for Eco-efficient firing processes*, Cordis – EU research results, 2018, <https://cordis.europa.eu/project/id/314636>.

49 IEA, *ETP Clean Energy Technology Guide*, 2025, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?layout=list&selectedTechID=all#more->.

Fale radiowe są wytwarzane przez dwie lub więcej elektrod, które są umieszczone po przeciwnych stronach materiału. Przyłożone do elektrod zmienne napięcie tworzy oscylujące pole elektryczne, otaczając materiał przeznaczony do podgrzania.

Rysunek 14. Schemat pracy ogrzewania falami radiowymi



Źródło: EECA, *Direct Process Heating. Microwave...*, op.cit.

Charakterystyka

Główną zaletą wykorzystania ogrzewania dielektrycznego jest generacja ciepła bezpośrednio wewnątrz docelowego materiału, przez co proces jest znacznie efektywniejszy – ogrzewany jest tylko materiał, a nie jego otoczenie. Dzięki temu temperatura wytworzonego ciepła może być niższa (mniejsze straty ciepła do otoczenia), a czas trwania procesu może się skrócić w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi. Dodatkowo technologia ta charakteryzuje się wysoką gęstością mocy i natychmiastowym startem (pełna moc w kilka sekund), co sprzyja szybkiemu nagrzewaniu docelowego produktu. Jej zaletą jest też możliwość precyzyjnej kontroli procesu (np. mocy, czasu nagrzewania).

43

Ogrzewania dielektryczne jest dobrym rozwiązaniem dla ogrzewania jednorodnych objętości. W przypadku materiałów niejednorodnych może wystąpić nierównomierne nagrzewanie. Dodatkowo zastosowanie tej technologii jest ograniczone do materiałów dielektrycznych zawierających cząsteczki polarne (np. woda).

Systemy z falami radiowymi pozwalają na głębsze przenikanie fal radiowych w głąb materiału i najlepiej sprawdzają się przy materiałach o prostym, regularnym kształcie oraz dużych objętościach. Systemy z mikrofalami nie przenikają tak głęboko, ale mają wyższą gęstość mocy i dobrze sprawdzają się przy materiałach o nieregularnych kształtach. Ma to przełożenie na zastosowanie tych technologii w przemyśle – mikrofałe często wykorzystywane są w przemyśle spożywczym, podczas gdy fale radiowe częściej wykorzystuje się przy nagrzewaniu większych materiałów, takich jak drewno czy tekstylia.

Przykład

Duńska firma Kallesøe Machinery produkuje urządzenia, które wykorzystują fale radiowe do utwardzania i wiązania klejów przy produkcji drewna klejonego warstwowo. Wykorzystanie fal radiowych sprawia, że proces jest bardzo wydajny, ponieważ podgrzewany jest wyłącznie klej, a nie całe drewno. System z falami radiowymi jest też znacznie bardziej energooszczędny – 6–11 kWh/m³, w porównaniu z systemem, w którym klej jest utwardzany w piecu gazowym – ponad 200 kWh/m³. Czas trwania procesu jest też znacznie krótszy dla fal radiowych niż dla pieca gazowego – 18–26 minut w porównaniu z 8 godzinami wcześniej⁵⁰.

9.8. Podsumowanie wybranych technologii

Tabela 2. Podsumowanie parametrów technicznych i ekonomicznych wybranych technologii

	Temperatura (°C)					Sprawność	Zastosowanie	TRL	CAPEX (mln euro/MW)			
	<100	100-200	200-400	400-1000	1000-1500				>1500	0-0,5	0,5-1	1-2
Pompa ciepła <100°C						COP 3,95-5,44	<ul style="list-style-type: none"> Żywność i napoje (gotowanie, suszenie, zagęszczanie, sterylizacja) Tekstylna i odzież (banwienie, pranie, suszenie) 	9				
Pompa ciepła >100°C						COP 2,7-3,05	<ul style="list-style-type: none"> Drewno i korek (suszenie) Papier (para procesowa, woda procesowa, suszenie) Chemia (suszenie, para procesowa) Wyroby mineralne (suszenie, utwardzanie) Samochody, sprzęt transportowy, maszyny (mycie, suszenie) 	8-9				
MVR						COP 3-30	<ul style="list-style-type: none"> Chemia (para procesowa) Metale i wyroby metalowe (para procesowa) Wyroby mineralne (suszenie) Drewno i korek (para procesowa) 	9				
Kocioł elektryczny						95-99%	<ul style="list-style-type: none"> Metale i wyroby metalowe (topienie, obróbka cieplna) Wyroby mineralne (topienie - szkło, obróbka cieplna) Samochody (odlewanie, obróbka cieplna) Żywność (pieczenie, suszenie, gotowanie, sterylizacja) Tekstylna (suszenie) 	9				
Ogrzewanie oporowe						50-99%	<ul style="list-style-type: none"> Metale i wyroby metalowe (topienie, obróbka cieplna) Wyroby mineralne (topienie - szkło, obróbka cieplna) Samochody (odlewanie, obróbka cieplna) Żywność (pieczenie, suszenie, gotowanie, sterylizacja) Tekstylna (suszenie) 	9				
Ogrzewanie indukcyjne						50-90%	<ul style="list-style-type: none"> Metale i wyroby metalowe (topienie, obróbka cieplna) Samochody (odlewanie, obróbka cieplna) 	9				
EAF						60-95%	<ul style="list-style-type: none"> Metale i wyroby metalowe (topienie) 	9				
Ogrzewanie podczerwią						60-90%	<ul style="list-style-type: none"> Żywność i napoje (suszenie, pieczenie, grillowanie, sterylizacja) Wyroby mineralne (suszenie) Tekstylna (suszenie, utwardzanie barwników) Samochody (suszenie, powierzchniowe podgrzewanie, utwardzanie) Drewno (suszenie) 	9				
Fale radiowe						50-85%	<ul style="list-style-type: none"> Żywność i napoje (suszenie, pieczenie, gotowanie, pasteryzacja, rozmrażanie, sterylizacja) Wyroby mineralne (suszenie) Tekstylna (suszenie, utwardzanie) Samochody (suszenie i utwardzanie powłok na plastikowych częściach) Drewno (suszenie, utwardzanie) 	3-9				
Ogrzewanie mikrofalowe						50-85%	<ul style="list-style-type: none"> Żywność i napoje (suszenie, pieczenie, gotowanie, pasteryzacja, rozmrażanie, sterylizacja) Wyroby mineralne (suszenie) Tekstylna (suszenie, utwardzanie) Samochody (suszenie i utwardzanie powłok na plastikowych częściach) Drewno (suszenie, utwardzanie) 	6-9				

Źródło: opracowanie własne Forum Energii.

10. Gospodarcze znaczenie elektryfikacji przemysłu w Unii Europejskiej i rola danych w kształtowaniu tego procesu

Jak pokazano w poprzednim rozdziale technologie dostępne dziś na rynku pozwalają zelektryfikować ponad połowę ciepła zużywanego w Polsce w procesach przemysłowych. Taka transformacja mogłaby ograniczyć zużycie paliw o ok. 60% kosztem istotnego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną. W dużych gospodarkach europejskich o podobnie zdwersyfikowanej strukturze przemysłu można oczekiwać zmian o zbliżonych proporcjach.

Skala potencjału przesuwą więc punkt ciężkości dyskusji – od pytania, czy elektryfikacja jest technologicznie możliwa, do pytań, jak szybko i w jakim zakresie może zostać wdrożona, oraz kto dostarczy niezbędnych urządzeń i w jakiej cenie. Jest to szczególnie istotne w kontekście ambicji, by proces ten był realizowany przez firmy z kapitałem europejskim lub przynajmniej w oparciu o produkcję ulokowaną w Europie.

Za takim podejściem stoi założenie Komisji Europejskiej, że masowa elektryfikacja przemysłu, obejmująca wymianę milionów urządzeń grzewczych oraz towarzyszącej infrastruktury, może stać się istotnym impulsem do rozwoju dla europejskiej gospodarki⁵¹ (o ile europejscy producenci będą w stanie zaspokoić zgłaszany popyt). Jednocześnie oznacza to ryzyko strategiczne: jeżeli Europa nie zwiększy zdolności produkcyjnych, nowy popyt może zostać przejęty przez dostawców spoza UE. Wówczas program europejskiej industrializacji nie przyniesie zamierzonego skutku.

Choć elektryfikacja nie nastąpi natychmiast, a cykl życia urządzeń jest mierzony w dekadach, historia ogniw fotowoltaicznych i baterii pokazuje, że utrata pozycji Europy na rynku może nastąpić bardzo szybko. Gdyby technologie elektryfikacji przemysłu podążyły podobną trajektorią, skutkami mogłyby być osłabienie pozycji europejskich dostawców, większa zależność od importu urządzeń oraz związane z tym ryzyka gospodarcze, których UE chce uniknąć.

Z tej perspektywy kluczowa staje się ocena, jakimi mocami produkcyjnymi dysponuje dziś Europa (na tle rynku globalnego) oraz, w jakim tempie muszą one wzrosnąć, aby przynajmniej pokryć rosnący popyt ze strony europejskich firm przemysłowych. Mimo metodycznych prób uzyskanie wiarygodnych danych ilościowych o tym segmencie dóbr okazało się niemożliwe.

51

Por. European Commission, *A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*, 2023, https://commission.europa.eu/document/download/41514677-9598-4d89-a572-abe21cb037f4_en.

Metodyka analizy rynku urządzeń elektryfikacyjnych dla przemysłu

Celem badania było określenie obecnej pozycji rynkowej oraz perspektyw rozwoju dla dziesięciu typów urządzeń analizowanych w tym raporcie. Choć dane o ograniczonej grupie producentów bywają łatwiejsze do pozyskania niż rzetelne informacje o popycie, w tym przypadku żadna z zastosowanych metod nie pozwoliła zebrać wiarygodnego, porównywalnego zestawu danych dotyczących produkcji.

Analizy Forum Energii objęły następujące źródła:

1. Statystykę publiczną (produkcja, sprzedaż, handel międzynarodowy). Kluczową barierą okazał się brak wystarczająco szczegółowych kategorii produktowych, co uniemożliwia jednoznaczne wydzielenie analizowanych urządzeń oraz porównania w czasie i między krajami. Dane o handlu międzynarodowym są wprawdzie dużo bardziej szczegółowe niż dane o produkcji i sprzedaży, ale ich wadą jest obrazowanie jedynie części rynku.
2. Stowarzyszenia branżowe. Brakuje organizacji branżowych skupiających ten segment producentów. Stowarzyszenie producentów pomp ciepła EHPA dopiero niedawno rozpoczęło zbieranie danych o przemysłowych pompach ciepła. Dla pozostałych technologii brak analogicznych struktur.
3. Analiza i weryfikacja istniejących danych. Dostęp do danych niszowych i potencjalnie wrażliwych (np. liczba producentów, wielkość rynku) okazał się ograniczony. Uznane inicjatywy (np. Clean Tech Tracker⁵²) nie obejmują tego segmentu produktów, natomiast wiarygodności liczb udostępnianych przez komercyjnych wydawców analiz rynkowych nie można było zweryfikować. Do nielicznych rzetelnych źródeł zaliczamy raport badacza IEA HPT Annex 58⁵³ projektu akademickiego dotyczącego przemysłowych pomp ciepła. Dla innych technologii brakuje analogicznego materiału.
4. Research z użyciem narzędzi genAI. Zastosowane narzędzia (Google AI Studio – Gemini Pro 3 i Grok 4.1 – SuperGrok) dostarczyły bogatego opisu producentów i rynku, ale większości danych liczbowych (i części jakościowych) nie udało się zweryfikować w niezależnych źródłach, dlatego materiał ten można wykorzystać jedynie w wybranych przypadkach.

46

Rozminięcie się ambicji z realnymi możliwościami wdrożenia omawianych technologii to największe, choć nie jedyne, ryzyko. Bez wiedzy o podaży nie można ocenić, czy europejskie specjalizacje produkcyjne odpowiadają potrzebom dekarbonizacji konkretnych branż i procesów. W praktyce import urządzeń w wybranych segmentach może być w pewnych okolicznościach uzasadniony – jednak bez danych trudno rozstrzygnąć, w jakich przypadkach jest to rozwiązanie przejściowe i racjonalne, a w jakich oznacza oddawanie pola konkurentom.

W kontekście europejskiej polityki handlowej brak danych utrudnia dobór adresatów i instrumentów wsparcia. Tymczasem dobór narzędzi zależy od charakteru bariery: inne instrumenty stosuje się, gdy ograniczeniami są skala i dojrzałość produkcji (wsparcie dla firm o ugruntowanej pozycji), inne gdy brakuje innowacji lub konkurencji (wsparcie dla start-upów), a jeszcze inne, gdy problemem są zasoby pracy i umiejętności (inwestycje w otoczenie biznesu i rynek pracy). Bez danych trudno zatem ocenić skuteczność instrumentów stosowanych w przeszłości, a więc korygować je i skalować w oparciu o dowody. Choćby z tych powodów jedną z rekomendacji jest monitoring danych o produkcji urządzeń niezbędnych do elektryfikacji przemysłu – nawet ze świadomością, że statystyka publiczna będzie dostarczać informacje z opóźnieniem.

52 Bruegel, European Clean Tech Tracker, <https://european-clean-tech-tracker.bruegel.org>.

53 IEA HPT, Projekt 58. Task 1: Technologies – State of the art and ongoing developments for systems and component, <https://heatpumpingtechnologies.org/project58/task1/>.

Czy Europa pozostanie globalnym liderem innowacji w technologiach elektryfikacyjnych dla przemysłu?

Na to pytanie trudno jednoznacznie odpowiedzieć. W technologiach elektryfikacji przemysłu istnieją cechy produktów i procesu wytwórczego, które w krótkim i średnim okresie sprzyjają utrzymaniu silnej pozycji Europy⁵⁴. Jednocześnie globalny wzrost popytu będzie premiował dostawców zdolnych do szybkiego zwiększania wolumenów, a skala produkcji przyspiesza uczenie się – zarówno w zakresie jakości, jak i kosztów jednostkowych. Jeśli wraz ze wzrostem rynku część rozwiązań będzie ulegać standaryzacji, przewaga kosztowo-wolumenowa Azji wzrośnie, grożąc udoskonalaniem kolejnych etapów produkcji.

W tym kontekście kluczowe staje się pytanie, jak utrzymać trwale wysoką wartość dodaną europejskiego łańcucha wartości oraz zdolność do dostarczania urządzeń dla krytycznych procesów produkcyjnych w UE. Dlatego w dłuższym horyzoncie znaczenia nabierają zdolność do ciągłej innowacji oraz ograniczanie ryzyk mogących utrudnić terminowe wprowadzanie urządzeń na rynek.

Co sprzyja utrzymaniu konkurencyjności w Europie?⁵⁵

- **Myśl technologiczna i doświadczenie.** Utrzymanie pozycji lidera w globalnym wyścigu technologii elektryfikacyjnych opiera się na unikalnej europejskiej myśli technologicznej oraz dekadach doświadczeń w zakresie inżynierii procesowej. W każdej z 10 analizowanych technologii Europa ma czołowych przedstawicieli (często więcej niż jednego). Wieloletnie doświadczenie przełożyło się na rozbudowaną bazę referencyjnych, zainstalowanych już w zakładach instalacji, co tworzy przewagę przy wyborze wykonawcy.

Status lidera ma tym większe znaczenie, że rynki pozostają na ogół skoncentrowane po stronie wytwórców. W większości analizowanych technologii rynek tworzy kilku globalnych liderów technologicznych (czasami są to duże koncerny inżynieryjne o szerokim portfolio), którym towarzyszy liczona ledwie w dziesiątkach grupa wytwórców kompletnych systemów. Krajobraz uzupełniają producenci rozwiązań niszowych, lokalni gracze konkurujący kosztami, wytwórcy części, integratorzy oraz start-upy. Koncentracja producentów jest notowana zwłaszcza tam, gdzie bariery technologiczne i kapitałowe utrudniają dopływ nowych interesariuszy. Taka struktura wytwórców sprzyja utrzymaniu trwałych przewag w porównaniu z segmentem bazującym na tanich, masowo wytwarzanych komponentach.

- **Przewodzenie w innowacjach.** Wiedza i wieloletnie doświadczenie przełożyły się na stworzenie i zagospodarowanie nisz technologicznych. Strategiczne znaczenie dla ochrony europejskiej przewagi ma silna koncentracja produkcji na terenie Europy. Siedziby firm, centra badawczo-rozwojowe (B+R) oraz kluczowe zakłady produkcyjne pozostają zlokalizowane w istniejących od dawna klastrach przemysłowych w:
 - regionie Niemiec, Austrii i Szwajcarii (ogrzewanie indukcyjne, EAF, pompy ciepła dużej mocy, MVR, urządzenia chłodnicze),
 - Skandynawii (wysokonapięciowe kotły elektryczne, wielkoskalowe pompy ciepła, zaawansowane materiały oporowe),
 - wyspecjalizowanych ośrodkach we Włoszech (klaster chłodniczy, ogrzewanie radiowe) czy Francji (mikrofały).

⁵⁴ Odpowiedź odnosi się do całej Europy, a nie wyłącznie do Unii Europejskiej, ponieważ w segmencie technologii elektryfikacyjnych dla przemysłu istotną rolę odgrywają także państwa spoza Unii, w szczególności Szwajcaria, Norwegia i Wielka Brytania. Ze względu na silne powiązania łańcuchów dostaw, inwestycji i handlu w regionie, rozwój tych producentów może wzmacniać europejską bazę kompetencji i podaży: zwiększa dostępność technologii, komponentów i usług w zbliżonych reżimach regulacyjnych oraz ułatwia współpracę projektową i serwisową na rynku unijnym. W praktyce oznacza to, że nawet gdy część wytwarzania pozostaje poza UE, korzyści w postaci przewidywalnych dostaw oraz utrzymania wiedzy technologicznej w Europie mogą przekładać się na odporność i konkurencyjność przemysłu unijnego.

⁵⁵ Materiał źródłowy do tej sekcji został przygotowany z pomocą generatywnej sztucznej inteligencji, a następnie zweryfikowany przez analityka.

Globalni liderzy technologiczni lokują swoje fabryki w Europie Środkowo-Wschodniej – w tym w Polsce. Kraje tego regionu posiadają firmy z własną myślą technologiczną, ale są to mniejsi gracze na światowym rynku. Jednocześnie widoczne są również oznaki ekspansji produkcji liderów na rynki pozaeuropejskie. W zależności od tego, jakie części łańcucha dostaw wytwarzane będą poza granicami Europy, ryzyko niekontrolowanego wycieku wiedzy technologicznej jest różne.

Europejska baza produkcyjna pozwala też na dalszą specjalizację w produkcji urządzeń najwyższej klasy – przesuwających granice technologiczne w zakresie sprawności energetycznej, integracji procesowej czy sterowania. Istotną rolę odgrywa także rozwój systemów dla niszowych zastosowań, odpowiadających na specyficzne potrzeby europejskiego przemysłu⁵⁶.

- **Małoseryjność.** Kolejnym czynnikiem stabilizującym pozycję Europy jest ograniczona standaryzacja i dominująca małoseryjność produktów, co w praktyce tworzy barierę wejścia na rynek dla podmiotów nastawionych na produkcję masową. W sektorze dominuje model tzw. projektowania na zamówienie (*engineered-to-order*), który obejmuje technologie o charakterze całkowicie unikatowym (np. systemy MVR, kompleksowe instalacje EAF) i rozwiązania małoseryjne wymagające głębokiej indywidualizacji procesowej (np. wysokotemperaturowe pompy ciepła, przemysłowe systemy mikrofalowe i radiowe). Nawet kiedy krytyczne części urządzenia podlegają pewnej standaryzacji (np. wymienniki ciepła, zawory, silniki elektryczne), ostateczny sukces wdrożenia zależy od precyzyjnej integracji systemowej oraz dostosowania elementów roboczych (np. wyparek MVR, sprzężarek, tunelów grzewczych) do specyfiki linii produkcyjnej i infrastruktury klienta. W efekcie perspektywa uzyskania efektów skali jest bardzo odległa.
- **Struktura kosztów premiująca usługę.** Cykl życia głównego urządzenia danej technologii mierzony jest w dekadach (ok. 10–30 lat, dla większości analizowanych w tym raporcie technologii wynosi on ponad 15 lat). Kluczowe elementy eksploatacyjne wymagają wymiany co kilka miesięcy lub lat, a poważne przeglądy i remonty odbywają się ok. 2–4 razy w cyklu eksploatacji. Wiąże się to z określonymi konsekwencjami.
 - Decyzja o wyborze dostawcy utrwała technologię w zakładzie na lata, tworząc efekt zapadki. Promuje to uznanych europejskich producentów, którzy gwarantują długowieczność firmy i dostęp do części w przyszłości.
 - W tym modelu istotna część wartości dodanej w cyklu życia urządzenia powstaje nie na etapie jego sprzedaży, lecz koncentruje się na usługach wokół niego: projektowaniu i integracji, uruchomieniu oraz późniejszym utrzymaniu, konserwacji i naprawach urządzenia. Ważną rolę odgrywają elementy zużywalne o krótkim czasie eksploatacji (np. promienniki podczerwieni czy lampy do ogrzewania falami radiowymi). W efekcie zyskowność dostawców przesuwa się z jednorazowej sprzedaży urządzenia w stronę kosztów serwisu i części zamiennych, a bliskość geograficzna i dostępność autoryzowanego serwisu w Europie stają się ważnym, pozacenowym kryterium wyboru wykonawcy. Pozwala to Europie na obronę rynku i narzucanie standardów serwisu, którego replikacja będzie dla globalnych konkurentów bardzo trudna.
 - Dzięki tak długiemu okresowi eksploatacji Europa zyskuje czas na stabilny rozwój sektora produkcji urządzeń i komponentów elektryfikujących przemysł, bo czas wymiany urządzeń rozłożony jest na lata⁵⁷. Gwałtowne wyparcia przez masowych dostawców spoza regionu, dla których brak możliwości pełnej standaryzacji, stanowi barierę operacyjną nie do przebycia.

56 Wśród niszowych zastosowań tworzących przewagę europejskich wytwórców znalazły się m.in. kotły elektryczne elastycznie reagujące na nadmiar OZE, pasteryzacja suchych produktów falami radiowymi, hartowanie komponentów do samochodów elektrycznych za pomocą ogrzewania indukcyjnego, suszenie elektrod do baterii Li-Ion za pomocą precyzyjnie sterowanych promienników podczerwieni.

57 Podobnie w przypadku kotłów gazowych, których okres technicznej eksploatacji szacuje się na ok. 20 lat. Ich eksploatacja może jednak skończyć się znacznie wcześniej, jeśli stanie się ekonomicznie nieopłacalna (tworząc tzw. aktywa osierocone). Jeśli zdolności produkcyjne Europy nie wzrosną dostatecznie, nagłe osierocenie aktywów gazowych może mieć negatywne konsekwencje zarówno dla sektora przetwórstwa (który nie będzie miał czym zasilić procesu wytwórczego), jak i producentów urządzeń (którzy zaczną mieć konkurentów z uwagi na niemożność zaspokojenia zgłaszanego popytu).

- **Perspektywa popytu na innowacyjne technologie elektryfikacyjne.** Przewaga konkurencyjna Europy w sektorze elektryfikacji przemysłu jest trwale zakorzeniona w rygorystycznym systemie regulacyjnym, który kształtuje stabilny popyt na technologie o najwyższych parametrach pracy. Unijne wymogi środowiskowe, standardy bezpieczeństwa oraz ramy zgodności⁵⁸ odgrywają rolę strategicznego filtra rynkowego. Z jednej strony wymuszają one na rodzimym przemyśle modernizację, a z drugiej – tworzą naturalne bariery wejścia na rynek dla podmiotów oferujących urządzenia niskokosztowe, które nie spełniają wyśrubowanych norm sprawności lub bezpieczeństwa. Paradoksalnie kluczowym stymulatorem innowacji stał się niekorzystny dla elektryfikacji stosunek cen energii elektrycznej do cen gazu. Wysokie koszty operacyjne w UE wymusiły na producentach rozwój urządzeń o najwyższej efektywności, zorientowanych na głęboką integrację z systemami odzysku ciepła. Między innymi dlatego europejskie wysokotemperaturowe pompy ciepła czy systemy MVR wyznaczają dziś globalne granice współczynników sprawności.

Restrykcyjne wymagania prawne mogą stworzyć dodatkowy rynek w obszarze cyberbezpieczeństwa. Rośnie znaczenie danych dotyczących obszaru eksploatacji oraz integracji instalacji z systemami zarządzania energią, a dostęp do nich i możliwość zdalnego sterowania stają się kluczowe dla niezawodnej pracy procesu. To natomiast zwiększa popyt na dostawców, którzy potrafią zapewnić bezpieczne i ciągłe działanie tych funkcji. Można oczekiwać, że w wielu zastosowaniach lokalne cyberbezpieczeństwo będzie traktowane jako warunek konieczny przy wyborze dostawcy, nawet kosztem wyższej ceny, jak wskazuje na to *Net-Zero Industry Act*.

Co sprzyja konkurentom Europy?

- **Przewaga kosztowa powtarzalnych komponentów.** Producenci spoza Europy mają przewagę kosztową w wytwarzaniu wystandaryzowanych urządzeń, podzespołów i części (wymyenników ciepła, elektroniki sterującej, materiałów izolacyjnych i oporowych). W tych kategoriach o pozycji rynkowej decydują przede wszystkim skala produkcji, koszty pracy i energii oraz sprawność łańcucha dostaw. Im większa część technologii będzie podlegać standaryzacji, tym trudniej będzie Europie utrzymać przewagę konkurencyjne oparte na kompetencjach i integracji.
- **Lokalny charakter usług.** To, co wzmacnia europejskich dostawców na rynku wewnętrznym, jednocześnie utrudnia ekspansję ich produktów na odległe rynki. Integracja, montaż i serwis są z natury związane z miejscem wdrożenia i nie podlegają prostemu eksportowi z Europy. Utrzymanie pozycji poza regionem wymaga więc budowy lokalnych sieci wykonawców, które z czasem mogą zostać włączone do ekosystemu rodzimego konkurenta, wraz z przejętą wiedzą i relacjami z klientami.
- **Perspektywa wysokiego popytu.** Dodatkową przewagę azjatyckim wytwórcom daje rosnący szybko popyt na rynku regionalnym, zwłaszcza w Chinach. Wysokie tempo elektryfikacji, relatywnie niski koszt energii elektrycznej na tle Europy oraz upowszechnienie OZE tworzą duży i stabilny rynek dla urządzeń elektryfikacji przemysłu (por. wykres 7 na s. 12). Taki wolumen ułatwia inwestycje w rozwój rodzimego sektora wytwórczego, a także wzmacnia bodźce do standaryzacji produkcji tam, gdzie odpowiada to lokalnym potrzebom.

Między innymi rozporządzenie w sprawie certyfikacji F-gazowej promujące odejście od gazów o wysokim współczynniku GWP (istotne dla pomp ciepła i agregatów chłodniczych), rozporządzenie wprowadzające graniczny podatek węglowy – CBAM (istotny dla EAF), dyrektywa PED dotycząca urządzeń ciśnieniowych (istotna dla kotłów elektrycznych, MVR i pomp ciepła), dyrektywa EMF dotyczące pola elektromagnetycznego (istotna dla urządzeń ogrzewania indukcyjnego, mikrofal i fal radiowych), a także dyrektywa ETS, dyrektywa RED III definiująca cele OZE dla przemysłu, dyrektywa IED dotycząca emisji przemysłowych i wykorzystująca mechanizm najlepszych dostępnych technik (BAT) oraz dyrektywa EcoDesign narzucająca minimalną sprawność urządzeń.

- **Kontrola nad początkiem łańcucha dostaw.** Przewagę azjatyckich producentów wzmacnia lepszy dostęp do surowców oraz zdolność do wytwarzania kluczowych komponentów i szybkiego zwiększania ich podaży – m.in. elektroniki mocy, wybranych elementów maszynowych. Dla Europy, która w wielu obszarach nie kontroluje tych ogniw, oznacza to większą podatność na wahania ich dostępności i cen. Problem nie musi dotyczyć całych urządzeń: może chodzić o materiały niezbędne do ich budowy (np. metale ziem rzadkich niezbędne do produkcji magnesów w silnikach pomp ciepła i urządzeń chłodniczych) lub o materiały eksploatacyjne, bez których instalacje nie mogą pracować (np. elektrody grafitowe do pieców łukowych czy materiały do emiterów podczerwieni). Dlatego kluczowe staje się ograniczanie ryzyk dostępności przez dywersyfikację dostawców, gromadzenie zapasów oraz rozwój rozwiązań mniej zależnych od tzw. wąskich gardeł. Przykładem takiej ścieżki jest zmiana w sposobie działania napędu elektrycznego (np. wentylatorów i sprężarek) – przejście od silników z magnesami trwałymi, których wytworzenie wymaga wykorzystania metali ziem rzadkich, do rozwiązań, takich jak silniki reluktancyjne.
- **Odpowiednia liczba specjalistów.** Wystarczająca liczba wykwalifikowanych pracowników oznacza, że ograniczenia kadrowe mogą być na innych rynkach obchodzone skuteczniej niż w Europie. W praktyce zwiększa to zdolność do równoległej realizacji projektów, szybszego uczenia się na wdrożeniach i rozbudowy zespołów uruchomieniowo-serwisowych.
- **Konsekwentnie wdrażana strategia przemysłowa.** Pozycja Chin w innowacyjnej produkcji przemysłowej rośnie, co w części segmentów prowadzi do wypierania unijnych producentów. U podstaw tej tendencji leżą aktywna polityka przemysłowa, ekspansywna polityka handlowa oraz konsekwentny rozwój gałęzi wysoko wiedzochłonnych. Przy takich uwarunkowaniach, a także biorąc pod uwagę kumulatywny charakter wiedzy i doświadczeń wdrożeniowych, należy zakładać dalsze postępy w rozwoju technologii elektryfikacyjnych dla przemysłu niezależnie od działań Europy.

Jakie słabości Europy utrudniają utrzymanie pozycji rodzimych producentów na rynku?

- **Brak skoordynowanej strategii przemysłowej.** Brak spójnej i precyzyjnej strategii przemysłowej na szczeblu unijnym oraz na szczeblach krajowych stanowi fundamentalną barierę dla systematycznej elektryfikacji przemysłu. Choć unijny *Pakt dla czystego przemysłu*⁵⁹ wyznacza ambitne cele dla sektorów ciężkich, takich jak stalowy, metalowy czy chemiczny, wciąż pomija on przemysł lekki, który ze względu na niższe parametry temperaturowe procesów jest naturalnym kandydatem do szybkiej i efektywnej kosztowo transformacji. Na poziomie państw członkowskich – czego przykładem jest Polska⁶⁰ – niedostatek strategii definiujących priorytetowe gałęzie gospodarki uniemożliwia wykreowanie silnych bodźców modernizacyjnych, które mogłyby zapewnić stabilny strumień zamówień na technologie dekarbonizacyjne dla producentów technologii. Skutkuje to rozproszaniem wysiłków i brakiem standaryzacji wymagań, co w efekcie osłabia rodzimych dostawców w starciu z konkurencją operującą na rynkach o jasno określonych priorytetach⁶¹.
- **Przewlekłość permittingu.** Niepewność inwestycyjną potęgują przewlekłe procesy administracyjne oraz zróżnicowana i często nieprzewidywalna praktyka nadawania pozwoleń na realizację inwestycji (tzw. permitting)⁶². Długi czas oczekiwania na decyzje nie tylko zamraża kapitał, ale bezpośrednio przekłada się na wyższe koszty projektów, zniechęcając wykonawców do ich wdrażania.

59 European Commission, *The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation*, 2025, https://commission.europa.eu/document/download/9db1c5c8-9e82-467b-ab6a-905feeb4b6b0_pl.

60 Opisane w poddanej konsultacjom społecznym *Strategii Rozwoju Polski 2035* (<https://www.gov.pl/web/fundusze-regiony/strategia-rozwoju-polski-do-2035-r->) kryteria są zbyt liczne i zbyt szerokie, aby prowadzić do zamkniętej listy kilku priorytetowych gałęzi.

61 S. Buchholtz, M. Dusiło, *Nowy ład przemysłowy 2024+. Jak rozsądnie zmodernizować polski przemysł?*, Forum Energii, 2024, <https://www.forum-energii.eu/modernizacja-przemyslu>.

62 Forum Energii, *Polskie sieci 2040. Gotowe na 90 GW OZE*, 2025, <https://www.forum-energii.eu/polskie-sieci-2040>; M. Draghi, *op.cit.*

- **Trwale niekorzystna relacja cen energii elektrycznej względem gazu ziemnego.** Utrzymywanie wysokiego stosunku cen prądu do gazu⁶³ drastycznie osłabia bodziec ekonomiczny do elektryfikacji, sprawiając, że dla wielu zakładów staje się ona nieopłacalna operacyjnie. Bez systemowego dostosowania struktury taryf oraz opłat sieciowych do specyfiki odbiorców przemysłowych⁶⁴ rynek dla technologii elektryfikacyjnych pozostanie ograniczony jedynie do nielicznych, najbardziej efektywnych jednostek, blokując rozwój masowego segmentu urządzeń o średniej wydajności.
- **Nieadekwatność systemu kształcenia ustawicznego.** Skutkuje to dotkliwym deficytem wykwalifikowanych kadr na europejskim rynku pracy. Skalowanie sektora elektryfikacji jest dziś hamowane przez ograniczoną dostępność zespołów projektowo-wdrożeniowych oraz wyspecjalizowanych serwisantów potrafiących dostosować swoje usługi do nowoczesnych norm bezpieczeństwa i standardów cyfrowych. Problem ten ma wymiar zarówno ilościowy, jak i jakościowy – tempo rozwoju technologii wyprzedza programy szkoleniowe, a brak systemowych rozwiązań w zakresie walidacji umiejętności podnosi koszty projektów i wydłuża czas ich realizacji. W większości krajów europejskich brakuje inicjatyw edukacyjnych działających w skali adekwatnej do potrzeb transformacji⁶⁵, co ogranicza tempo dekarbonizacji nie tylko w przemyśle.
- **Ograniczenia wzrostu przedsiębiorstw.** Poważnym zagrożeniem dla autonomii technologicznej Europy jest ograniczony dostęp do kapitału na rozwój firm⁶⁶. Jeśli rodzime przedsiębiorstwa są zbyt małe, by samodzielnie konkurować globalnie, stają się zagrożone przejęciem przez gigantów z USA czy Azji. W przeszłości europejskie firmy z analizowanych sektorów były przedmiotem takich przejęć, prowadząc do transferu własności intelektualnej i decyzyjności poza granice UE. Potrzebne są mechanizmy wspierające organiczny wzrost europejskich czempionów oraz ochrony przed wrogimi przejęciami w sektorze clean tech. W przeciwnym razie Europa straci jedną ze swoich specjalizacji, a realizacja celu dekarbonizacji unijnej gospodarki stanie się w ogólnym rozrachunku trudniejsza i droższa.

⁶³ Ten wątek stanowił jeden z filarów diagnozy pogarszającej się pozycji konkurencyjnej Europy sformułowanej przez Mario Draghiego w raporcie napisanym na zlecenie Komisji Europejskiej w 2024 r. Więcej aktualnych statystyk o cenach energii na stronie 25 tego raportu.

⁶⁴ A. Jahn, A. Gawlikowska-Fyk, *Dynamiczne i sprawiedliwe. Przyszły kształt taryf sieciowych w Polsce*, Forum Energii, 2021, <https://www.forum-energii.eu/dynamiczne-i-sprawiedliwe-przyszly-ksztalt-taryf-sieciowych-w-polsce>.

⁶⁵ O tym wyzwaniu na przykładzie polskiego sektora budownictwa piszemy w raporcie *Czyste ciepło jako motor polskiej gospodarki* (Forum energii, 2022, <https://www.forum-energii.eu/czyste-cieplo-jako-motor-polskiej-gospodarki>).

⁶⁶ M. Draghi, *op.cit.*

Załącznik 1.

Schemat klasyfikacji gałęzi przemysłu według Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD)

Id	Skrót	Dział	Sekcja	
B05	Górnictwo węgla	Wydobywanie węgla kamiennego i węgla brunatnego	B Górnictwo i wydobywanie	
B06	Górnictwo ropy i gazu	Górnictwo ropy naftowej i gazu ziemnego		
B07	Górnictwo rud metali	Górnictwo rud metali		
B08-09	Pozostałe górnictwo	Pozostałe – Górnictwo i wydobywanie		
C10	Żywność	Produkcja artykułów spożywczych	C Przetwórstwo przemysłowe	
C11	Napoje	Produkcja napojów		
C12	Tytoń	Produkcja wyrobów tytoniowych		
C13	Tekstylia	Produkcja wyrobów tekstylnych		
C14	Odzież	Produkcja odzieży		
C15	Garbarstwo	Produkcja skór i wyrobów ze skór wyprawionych		
C16	Drewno i korek	Produkcja wyrobów z drewna oraz korka		
C17	Papier	Produkcja papieru i wyrobów z papieru		
C18	Poligrafia	Poligrafia i reprodukcja zapisanych nośników informacji		
C19	Rafinerie i koksownie	Wytwarzanie i przetwarzanie koksu i produktów rafinacji ropy naftowej		
C20	Chemia	Produkcja chemikaliów i wyrobów chemicznych		
C21	Farmaceutyki	Produkcja podstawowych substancji farmaceutycznych		
C22	Guma i tworzywa	Produkcja wyrobów z gumy i tworzyw sztucznych		
C23	Wyroby mineralne	Produkcja wyrobów z pozostałych mineralnych surowców niemetalicznych		
C24	Metale	Produkcja metali		
C25	Wyroby metalowe	Produkcja metalowych wyrobów gotowych		
C26	Elektronika	Produkcja komputerów, wyrobów elektronicznych i optycznych		
C27	Urz. elektryczne	Produkcja urządzeń elektrycznych		
C28	Pozostałe maszyny	Produkcja maszyn i urządzeń, gdzie indziej niesklasyfikowana		
C29	Samochody	Produkcja pojazdów samochodowych, przyczep i naczep, z wyłączeniem motocykli		
C30	Sprzęt transp.	Produkcja pozostałego sprzętu transportowego		
C31	Meble	Produkcja mebli		
C32	Inne wyroby	Pozostała produkcja wyrobów		
C33	Naprawa maszyn	Naprawa, konserwowanie i instalowanie maszyn i urządzeń		
E36	Dostawa wody	Pobór, uzdatnianie i dostarczanie wody		E Dostawa wody; gospodarowanie ściekami i odpadami oraz działalność związana z rekultywacją
E37	Gospod. ściekami	Odprowadzanie i oczyszczanie ścieków		
E38-39	Inne odpady	Pozostałe – Dostawa wody; gospodarowanie ściekami i odpadami oraz działalność związana z rekultywacją		

Załącznik 2.

Lista procesów wykorzystujących ciepło w przetwórstwie przemysłowym

Wskazanie kilku technologii elektryfikacyjnych przy danych procesie przemysłowym oznacza, że istnieją alternatywy rozwiązania. Wybór jednego z nich zależy od szczegółów procesu w danej fabryce – przykładowo w przypadku suszenia od kształtu suszonego obiektu, wstępnego i docelowego poziomu wilgoci.

Tabela 3. Lista procesów w przetwórstwie przemysłowym wykorzystujących ciepło

Poziom temperaturowy	Proces	Technologia elektryfikacyjna	Zużycie ciepła (TJ)*
Ogrzewanie	Ogrzewanie	Pompa ciepła	26 638
Chłodzenie procesowe	Chłodzenie procesowe	Chłodziarka sprężarkowa	5726
Ciepło procesowe <100°C	Ciepło procesowe	Pompa ciepła	2799
	Prefabrykacja	Pompa ciepła	1431
	Przygotowanie masy papierniczej	Pompa ciepła	941
	Suszenie	Pompa ciepła / suszenie mikrofalowe / na podczerwień	1221
	Suszenie	Suszenie mikrofalowe / na podczerwień	2529
	Suszenie	Suszenie podczerwienią / mikrofalowe / falami radiowymi	3484
	Suszenie	Suszenie podczerwienią / mikrofalowe / falami radiowymi / oporowe	352
	Suszenie parowe	Pompa ciepła	761
Ciepło procesowe 100–200°C	Obróbka cieplna	Ogrzewanie oporowe / mikrofalowe / na podczerwień	626
	Para technologiczna	Pompa ciepła / MVR	89 727
	Suszenie	Suszenie mikrofalowe / na podczerwień	3810
	Suszenie parowe	Pompa ciepła / MVR	6194
Ciepło procesowe 200–400°C	Destylacja atmosferyczna (rafineria)		45 186
	Destylacja próżniowa (rafineria)		18 235
	Hydrokraking (rafineria)		11 207
	Hydrorafinacja (rafineria)		48 647
	Kraking katalityczny (rafineria)		63
	Para technologiczna	Kocioł elektryczny	38 953
	Pieczenie	Piece oporowe/mikrofalowe/na podczerwień	3359
	Pozostałe (rafineria)		34 465
	Suszenie	Suszenie mikrofalowe/na podczerwień	915
	Suszenie parowe	Kocioł elektryczny	275

Ciepło procesowe 400–1000°C**	Kalcynacja		2149
	Kalcynacja wstępna		21 522
	Końcowa obróbka	Ogrzewanie indukcyjne / oporowe	4639
	Końcowa obróbka	Ogrzewanie oporowe	1546
	Kraking katalityczny (rafineria)		11 401
	Kraking parowy		61 957
	Obróbka cieplna	Piece indukcyjne / oporowe	6580
	Odlewanie	Ogrzewanie indukcyjne / oporowe / elektryczne piece łukowe	666
	Stal wtórna		3179
	Pozostałe (rafineria)		8238
	Wstępna obróbka	Ogrzewanie indukcyjne / oporowe / elektryczne piece łukowe	347
Ciepło procesowe >1000°C***	Końcowa obróbka		2622
	Odlewanie	Ogrzewanie indukcyjne / oporowe / elektryczne piece łukowe	4802
	Odlewanie	Piece indukcyjne / oporowe	5899
	Odlewanie/Walcowanie	Ogrzewanie indukcyjne	18 838
	Spawanie	Spawanie indukcyjne / oporowe / łukiem plazmowym	4545
	Spiekanie		14 877
	Topienie	Ogrzewanie indukcyjne / oporowe / elektryczne piece łukowe	10 528
	Topienie	Ogrzewanie oporowe	18 486
	Wypał		2244
	Wypał ceramiki		25 706
	Wypał klinkieru		33 563

Źródła: pozycje bibliograficzne [11]–[34].

* Pogrubione wartości zużycia są możliwe do elektryfikacji obecnie dostępnymi technologiami.

** W tabeli nie uwzględniono zużycia ciepła na produkcję wodoru (39 147 TJ), ponieważ dla wodoru dostępna jest oddzielna ścieżka elektryfikacji (elektroliza).

*** W tabeli nie przedstawiono zużycia ciepła w piecach łukowych, ponieważ są one już zasilane energią elektryczną. Nie przedstawiono również zużycia w koksowniach (36 492 TJ) – ciepło to pochodzi ze spalania gazu koksowniczego, który jest nieuniknionym produktem procesu koksowania, a także zużycia w wielkich piecach, ponieważ koks (i pył węglowy), będący źródłem ciepła, odgrywa jednocześnie inne role, takie jak redukcja rudy żelaza czy utrzymywanie struktury i przewiewu. Ciepła pochodzącego z wymienionych paliw nie można zatem zastąpić energią elektryczną w procesie wielkopieczowym, ponieważ bez nich nie mógłby on przebiegać.

Załącznik 3.

Parametry i charakterystyka technologii ogrzewania elektrycznego w przemyśle

Charakterystyka	Technologia			Źródła danych
	Pompa ciepła <100°C	Pompa ciepła >100°C	MVR	
Temperatura (°C)	100	165	250	[35], [40], [41]
COP	3,95-5,44	2,7-3,05	3-30	[11], [41], [42]
TRL	9	8-9	9	[35], [40]
CAPEX (mln euro/MW/a)*	0,2-0,73	0,87-1,63	0,35-1,3	[35], [42], [43]
OPEX (euro/MW/a, euro/MWh)**	2000 euro/MW/a + 1,8 euro/MWh	970 euro/MW/a + 1,8 euro/MWh	2000 euro/MW/a + 1,8 euro/MWh	[42]
Żywotność (lata)	20	20	25	[42]
* CAPEX na podstawie opracowań z lat 2017, 2019 i 2023. ** OPEX na podstawie opracowania z 2019 r.				
Charakterystyka	Kocioł elektryczny		Źródła danych	
Temperatura (°C)	500		[40]	
Sprawność (%)	95-99		[11], [40]	
TRL	9		[40]	
CAPEX (mln euro/MW/a)*	0,08-0,21		[42], [43], [47], [48]	
OPEX* (euro/MW/a, euro/MWh)**	1231 euro/MW/a + 0,6 euro/MWh		[42], [43], [47], [48]	
Żywotność (lata)	20-25		[42], [47]	
* CAPEX i OPEX na podstawie opracowań z lat 2017, 2019 i 2023				
Charakterystyka	Ogrzewanie oporowe		Źródła danych	
Temperatura (°C)	1850		[40], [52]	
Sprawność (%)	50-99		[11], [40]	
TRL	9		[40]	
CAPEX (mln euro/MW)*	0,06-11,93		[42], [53], [54]	
OPEX (%)**	3-10% kosztów CAPEX		[54]	
Żywotność (lata)	7-35		[54]	
* CAPEX na podstawie opracowań z lat 2019 i 2023. ** OPEX na podstawie opracowania z 2023 r.				

Charakterystyka	Ogrzewanie indukcyjne		Źródła danych
Temperatura (°C)	3000		[40], [41]
Sprawność (%)	50-90		[40], [41]
TRL	9		[40]
CAPEX (mln euro/MW)*	0,06-2,22		[54], [57]
OPEX (%)**	5-15% kosztów CAPEX		[54]
Żywotność (lata)	25-30		[54]
* CAPEX na podstawie opracowań z lat 2014 i 2023. ** OPEX na podstawie opracowania z 2023 r.			
Charakterystyka	EAF		Źródła danych
Temperatura (°C)	1800		[40]
Sprawność (%)	60-95		[11], [40]
TRL	9		[40]
CAPEX (mln euro/MW)*	0,46-2,59		[58]
OPEX (%)**	30-40% kosztów CAPEX		[59], [60]
*CAPEX na podstawie opracowania z 2024 r. **OPEX na podstawie opracowań z lat 2010 i 2013			
Charakterystyka	Ogrzewanie podczerwienią		Źródła danych
Temperatura (°C)	2200 (w opracowaniu uwzględniono zastosowania technologii do 400°C)		[41]
Sprawność (%)	60-90		[11], [41]
TRL	9		[64]
CAPEX (mln euro/MW)*	0,08-0,62		[40], [41], [46], [65]
OPEX (euro/MWh)**	10-117		[42], [46]
Żywotność (lata)	30		[42], [46]
* CAPEX na podstawie opracowań z lat 2014, 2018, 2019 i 2023. ** OPEX na podstawie opracowań z lat 2019 i 2023			
Charakterystyka	Ogrzewanie mikrofalowe	Fale radiowe	Źródła danych
Temperatura (°C)	2000 (w opracowaniu uwzględniono zastosowania technologii do 400°C)	2000 (w opracowaniu uwzględniono zastosowania technologii do 400°C)	[41]
Sprawność (%)	50-85%	50-85%	[11], [40], [41]
TRL*	6-9	3-9	[64]
CAPEX (mln euro/MW)**	0,83-3	0,14-2	[42], [46], [67]
OPEX (euro/MWh)**	10-45,8	45,8	[42], [46]
Żywotność (lata)	30	30	[42], [46]
* TRL = 9 dla zastosowań związanych z ogrzewaniem w niskich i średnich temperaturach. TRL = 3-6 dla zastosowań związanych z ogrzewaniem w wysokich temperaturach.			
** CAPEX i OPEX na podstawie opracowań z lat 2019 i 2023			

Bibliografia

- [1] Pathak M. *et al.*, *Technical Summary. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2022, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/technical-summary/>.
- [2] Zbiory danych Eurostatu: naio_10_cp1750, nrg_pc_202, nrg_pc_203, nrg_pc_204, nrg_pc_205, nama_10_a64, env_ac_ainah_r2, nama_10_a64_e, env_ac_pefa04, nrg_bal_c.
- [3] ENTSOG, Transparency Platform, <https://transparency.entsog.eu>.
- [4] NBP, „Szybki Monitoring NBP. Analiza sytuacji sektora przedsiębiorstw”, Departament Analiz i Badań Ekonomicznych, nr 4(2024), <https://nbp.pl/wp-content/uploads/2024/10/Szybki-Monitoring-NBP-pazdziernik-2024.pdf>.
- [5] Eurostat, Greenhouse gas emission footprints (in CO₂ equivalent, FIGARO application), kod: env_ac_ghgfp.
- [6] Gagg C.R., *Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis*, “Engineering Failure Analysis”, vol. 40 2014, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630714000387>.
- [7] GUS, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2022 i 2023*, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/>.
- [8] Pinchbeck E. *et al.*, *The Seventh Carbon Budget Advice for the UK Government*, Climate Change Committee, 2025, <https://www.theccc.org.uk/publication/the-seventh-carbon-budget/>.
- [9] Walter D., Bond K., Butler-Sloss S., *The electrification imperative. How a switch from burning fossil fuels to using electricity can unlock the full value of the energy transition*, EMBER, 2025. <https://ember-energy.org/latest-insights/the-electrification-imperative/>.
- [10] Rangelova K., Jones D., *Solar electricity every hour of every day is here and it changes everything*, EMBER, 2025, <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/06/Ember-24-Hour-Solar-Electricity-June-2025-6.pdf>.
- [11] Madeddu S. *et al.*, *The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat)*, Environmental Research Letters, t. 15, nr. 2020, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbd02>.
- [12] Rehfeldt M., Fleiter T., Toro F., *A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry*, “Energy Efficiency”, t. 11, nr 5, 2018, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-017-9571-y>.
- [13] Hamel B.B., Brown H.L., Hedman A.B., *Energy Analysis of 108 Industrial Processes*, U.S. Department of Energy, 1979.
- [14] European Commission, *JRC-IDEES-2021*, Joint Research Centre (JRC), 2024, <http://data.europa.eu/89h/82322924-506a-4c9a-8532-2bdd30d69bf5>.
- [15] Hartner M. *et al.*, *Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables). Work package 3: Scenarios for heating & cooling demand and supply until 2020/2030*, European Commission, 2016, https://energy.ec.europa.eu/publications/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment-fossilrenewables-1_en.
- [16] Barthe P. *et al.*, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas*, Publications Office of the European Union, 2015, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/REF_BREF_2015.pdf.
- [17] Worrell E., Galitsky C., *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005, <https://www.osti.gov/servlets/purl/862119>.

- [18] European Commission, *Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry*, 2005, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-02/SF_BREF_D1_web.pdf.
- [19] GUS, *Rocznik Statystyczny Przemysłu 2023*, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-przemyslu-2023,5,17.html>.
- [20] GUS, *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2023 r.*, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/przemysl-budownictwo-srodki-trwale/przemysl/produkcja-wyrobow-przemyslowych-w-2023-roku,8,7.html>.
- [21] Merrittand R.R., Johnson J.W., *Steam Curing of Portland Cement at Atmospheric Pressure*, Iowa State Highway Commission, 1962.
- [22] Schorcht F. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of cement, Lime and Magnesium Oxide*, European Commission, 2013, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf.
- [23] Scalet B.M. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass*, European Commission, 2013, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/GLS_Adopted_03_2012_0.pdf.
- [24] European Commission, *Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry*, 2007, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/cer_bref_0807.pdf.
- [25] Boulamanti A., Moya Rivera J.A., *Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the Chemical and Petrochemical Industry*, European Commission, 2017, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105767>.
- [26] Falcke H. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals*, European Commission, 2017, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC109279_LVOC_Bref.pdf.
- [27] B. Jabarivelisdeh et al., *Ammonia Production Processes from Energy and Emissions Perspectives: A Technical Brief*, University of California Santa Barbara, 2022, <https://www.c-thru.org/wp-content/uploads/2022/12/Ammonia-Technical-Brief-June2022.pdf>.
- [28] GUS, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2021 i 2022*, 2023, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2021-i-2022,4,18.html>.
- [29] Eurostat, *Energy balance flow diagram (year 2023)*, https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=EU27_2020&year=2023&unit=KTOE&fuels=TOTAL&highlight=_&nodeDisagg=010100000000&flowDisagg=false&language=EN.
- [30] Remus R., Aguada Monsonet M.A., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*, European Commission, 2013, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/IS_Adopted_03_2012.pdf.
- [31] Cusano G. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries*, European Commission, 2017, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041_NFM_bref2017.pdf.
- [32] Suhr M. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*, European Commission, 2015, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf.
- [33] Roth J. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Textiles Industry*, European Commission, 2023, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-01/TXT_BREF_2023_for_publishing%20ISSN%201831-9424_final_1_revised.pdf.

- [34] Raunkjaer Stubdrup K. et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Wood-based Panels*, European Commission, 2016, https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/WBPbref2016_0.pdf.
- [35] IEA, *Annex 58. High-Temperature Heat Pumps. Task 1-Technologies*, 2023, <https://heatpumpingtechnologies.org>.
- [36] GUS, *Rocznik Statystyczny Przemysłu 2023*, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-przemyslu-2023,5,17.html>.
- [37] Janik K., Swoczyna B., *Produkcja pod napięciem #2 Aspekty finansowe elektryfikacji przetwórstwa przemysłowego w Polsce*, Instytut Reform, 2025, <https://ireform.eu/nasze-projekty/produkcja-pod-napieciem-2-aspekty-finansowe-elektryfikacji-przetworstwa-przemyslowego-w-polsce-nowy-raport-instytutu-reform/>.
- [38] North J., *What are TRLs? Technology Readiness Levels Explained*, The Big Bang Partnership, 2025, <https://bigbangpartnership.co.uk/what-are-trl-technology-readiness-levels-explained>.
- [39] KAPE, KE, MKiŚ, *Dobre praktyki w MŚP. Pompa ciepła*, 2020.
- [40] Fraunhofer ISI, *Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Study on behalf of Agora Industry*, 2024, <https://www.agora-industry.org/publications/direct-electrification-of-industrial-process-heat>.
- [41] Beyond Zero Emissions, *Zero Carbon Industry Plan. Electrifying Industry*, 2018, <https://www.bze.org.au/research/report/electrifying-industry>.
- [42] DEA (Energistyrelsen), *Technology Data for Industrial Process Heat*, 2022, <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-industrial-process-heat>.
- [43] Berenschot, *Electrification in the Dutch process industry. In-depth study of promising transition pathways and innovation opportunities for electrification in the Dutch process industry*, 2017, https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/3K02_Finalreport_1489735856.pdf.
- [44] Wilk V. et al., *DryFiciency. Waste Heat Recovery in Industrial Drying Processes. Integrated Heat Pump Systems*, 2019, www.dryficiency.eu.
- [45] Wienerberger – Brick Industry, 2025, <https://dryficiency.eu/integration-demonstration/wienerberger-brick-industry>.
- [46] Bedocchi C., Cassetti G., *Electrification of Industrial Heat: The key to a sustainable and competitive industry*, ECCO, 2025, <https://eccoclimate.org/electrification-of-industrial-heat-the-key-to-a-sustainable-and-competitive-industry/>.
- [47] Grosse R. et al., *Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU*, 2017, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109006>.
- [48] Bolesta J. et al., *Ocena wpływu rozstrzygnięć unijnego pakietu „Fit for 55” na transformację sektora ciepłownictwa systemowego w Polsce*, PTEZ, 2023, <https://ptec.org.pl/raporty/ocena-wplywu-rozstrzygniec-unijnego-pakietu-fit-for-55-na-transformacje-sektora-cieplownictwa-systemowego-w-polsce/>.
- [49] LOOS BOSCH Kotły Przemysłowe, *Elektryczny kocioł parowy LOOS Bosch ELSB w nowoczesnym zakładzie PepsiCo*, 2024, <https://bosch-industrial.pl/wp-content/uploads/2024/10/PEPSICO-case-study.pdf>.
- [50] EECA, *Direct Process Heating. Ohmic Direct Resistance Heating*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Direct-process-heating-ohmic-direct-resistance-heating.pdf>.
- [51] EECA, *Indirect Electric Resistance Process Heating. Conduction, Convection & Radiation Electric Heaters*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Indirect-electric-resistance-process-heating-conduction-convection-radiation-electric-heaters.pdf>.
- [52] CEATI, *Electrotechnologies. Energy Efficiency Reference Guide For Small to Medium Industries*, 2007, https://www.hydroone.com/savingmoneyandenergy_/energysavingsforbusiness_/Documents/Electrotechnologies_Reference_Guide.pdf.

- [53] ERM, *Future Opportunities for Electrification to Decarbonise UK Industry*, Department for Energy Security and Net Zero, 2023, <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67295df0541e1dfbf71e8b50/future-opportunities-for-electrification-to-decarbonise-uk-industry.pdf>.
- [54] Fleiter T. et al., *CO₂-neutrale Prozesswärme-erzeugung, Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen*, Umwelt Bundesamt, 2023, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161_2023_texte_prozesswaermepumpen_0.pdf.
- [55] Reynolds A., *Scaling up electric melting for the glass industry*, 2025, https://webasset.fivesgroup.com/Glass/Glass_melting/Fives%20Glass.pdf.
- [56] Silva S., *Electric Melting – Growing capabilities. Where is the limit?*, 2025, https://cdn.ymaws.com/sgt.org/resource/resmgr/furnacesolutions/fs19-2025/2025_06_04_furnace_solutions.pdf.
- [57] Electric Power Research Institute, *Energy Savings with Induction Process Heating. Overview, Applications and Case Studies*, 2014, <https://www.slideshare.net/slideshow/induction-heating-operation-applications-and-case-studies/71031936>.
- [58] Hüttel A., Lehner J., *Revisiting Investment Costs for Green Steel: Capital Expenditures, Firm Level Impacts, and Policy Implications*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2024, 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.
- [59] Wörtler M. et al., *Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050*, BCG, Stahl, 2013, https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/Schlussbericht-Studie-Low-carbon-Europe-2050_-Mai-20131.pdf.
- [60] IEA, *Iron and Steel Technology Brief*, 2010, <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/IO2-Iron&Steel-GS-AD-gct.pdf>.
- [61] Czernecki J. et al., *Dwuetapowy proces odmiedziowania żużla zawieszinowego*, „Rudy Metale Nieżelazne” R51 nr 7, 2006, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-AGH6-0005-0020>.
- [62] KGHM Polska Miedź, Głogów, <https://kg hm.com/pl/biznes/hutnictwo-i-rafinacja/glogow>.
- [63] Stach R., *Dzień Analityka – prezentacja*, Lubin 12–14 lutego 2019 r., https://kg hm.com/sites/default/files/kg hm_prezentacja_da_2019.pdf.
- [64] IEA, *ETP Clean Energy Technology Guide*, 2025, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?layout=list&selectedTechID=all#more->.
- [65] Electric Power Research Institute, *Energy Savings with Induction Process Heating. Overview, Applications and Case Studies*, 2014, <https://www.slideshare.net/slideshow/induction-heating-operation-applications-and-case-studies/71031936>.
- [66] Projekt DAPHNE, *Adaptive production systems and measurement and control equipment for optimal energy consumption and near-to-zero emissions in manufacturing processes*, 2015, <https://cordis.europa.eu/project/id/314636/reporting>.
- [67] EECA, *Direct Process Heating. Microwave and Radio Frequency*, 2019, <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Direct-Process-Heating-microwave-radio-frequency.pdf>.
- [68] European Commission, *The future of European competitiveness: Report by Mario Draghi*, 2024, https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059.
- [69] European Commission, *A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*, 2023, https://commission.europa.eu/document/download/41514677-9598-4d89-a572-abe21cb037f4_en.
- [70] Bruegel, *European Clean Tech Tracker*, <https://european-clean-tech-tracker.bruegel.org>.

IEA HPT, *Projekt 58. Task 1: Technologies – State of the art and ongoing developments for systems and component*, <https://heatpumpingtechnologies.org/project58/task1/>.

[71] European Commission, *The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation*, 2025, https://commission.europa.eu/document/download/9db1c5c8-9e82-467b-ab6a-905feeb4b6b0_pl.

[72] Buchholtz S., Dusiło M., *Nowy ład przemysłowy 2024+. Jak rozsądnie zmodernizować polski przemysł?*, Forum Energii, 2024, <https://www.forum-energii.eu/modernizacja-przemyslu>.

[73] Buchholtz S., Kleinschmidt P., Wiśniewska J. et al., *Czyste ciepło jako motor polskiej gospodarki*, Forum Energii, 2022 <https://www.forum-energii.eu/czyste-cieplo-jako-motor-polskiej-gospodarki>.

[74] Adamczewski T. et al., *Polskie sieci 2040. Gotowe na 90 GW OZE*, Forum Energii, 2025 <https://www.forum-energii.eu/polskie-sieci-2040>.

[75] Jahn A., Gawlikowska-Fyk A., *Dynamiczne i sprawiedliwe. Przyszły kształt taryf sieciowych w Polsce*, Forum Energii, 2021, <https://www.forum-energii.eu/dynamiczne-i-sprawiedliwe-przyszly-ksztalt-taryf-sieciowych-w-polsce>.

Modernizacja
albo marginalizacja
Jak elektryfikacja
przemysłu może zapewnić
Polsce bezpieczeństwo,
konkurencyjność i wzrost
gospodarczy?



FORUM ENERGII
ul. Wspólna 35/10, 00-519 Warszawa
NIP: 7010592388, KRS: 0000625996, REGON: 364867487

www.forum-energii.eu