

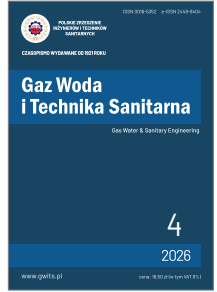


POLSKIE ZRZESZENIE  
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
SANITARNYCH

# Gaz Woda i Technika Sanitarna

## Gas Water & Sanitary Engineering

Artykuł dostępny / Open Access: [www.gwits.pl](http://www.gwits.pl)



## Dekarbonizacja energetyki

### Decarbonisation of the energy sector

Wojciech Kramarek<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup> Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie

\*Kontakt / Correspondence: [wojciech.kramarek@pansim.edu.pl](mailto:wojciech.kramarek@pansim.edu.pl)

#### Streszczenie:

Rosnące zapotrzebowanie na energię, dominacja paliw kopalnych oraz zmiany klimatu sprawiają, że dekarbonizacja energetyki jest kluczowym wyzwaniem współczesnego świata. Zestawienie charakterystyk technologii wytwarzania energii z danymi o zmianach w produkcji i emisji wskazuje trendy i różnice tempa transformacji między Unią Europejską a resztą świata. Odnawialne źródła energii, wysokosprawne układy kogeneracyjne, magazynowanie energii oraz energetyka jądrowa należą do kluczowych rozwiązań w ograniczaniu emisyjności sektora energetycznego.

**Słowa kluczowe:** dekarbonizacja, energetyka, OZE, odnawialne źródła energii, paliwa kopalne, emisja

#### Abstract:

Growing energy demand, the continued dominance of fossil fuels, and ongoing climate change make the decarbonisation of the energy sector one of the key challenges facing the modern world. Combining the characteristics of energy generation technologies with data on changes in electricity production and associated emissions reveals clear trends and differences in the pace of energy transition between the European Union and the rest of the world. Renewable energy sources, high-efficiency cogeneration systems, energy storage technologies, and nuclear power constitute key solutions for reducing the carbon intensity of the energy sector.

**Keywords:** decarbonization, power engineering, RES, renewable energy sources, fossil fuel, emission

### 1. Definicja energetyki

Energetyka jest działem nauki i techniki, a także pewnym sektorem przemysłu, która zajmuje się przetwarzaniem dostępnych form energii na postać łatwą do wykorzystania przy zasilaniu wszelkich procesów przemysłowych, a także napędzaniu maszyn i urządzeń używanych w życiu codziennym.

Energetyka dostarcza energię w dwóch postaciach:

- energiej elektrycznej – dostarczanej do odbiorcy przez sieć elektryczną, produkowanej za pomocą generatorów elektrycznych, napędzanych różnymi źródłami energii,
- energiej cieplnej – dostarczanej odbiorcy za pośrednictwem transportującego ciepło nośnika, najczęściej jest to para wodna pod dużym ciśnieniem, ogrzana woda lub inne płyny.

Energia jest niezbędna dla przetrwania i rozwoju człowieka, a dla gospodarki narodowej i bezpieczeństwa jest kluczowa. Z perspektywy świata energia stanowi ważny fundament dla szybkiego rozwoju gospodarki światowej, w której odsetek zużycia energii kopalnej stanowi zdecydowaną większość całkowitego

zużycia energii. Energetyka należy do sektorów gospodarki o najbardziej szkodliwym wpływie na środowisko naturalne i zdrowie.

Wraz z wyczerpywaniem się paliw kopalnych, zanieczyszczeniem środowiska i zmianą klimatu energia staje się wąskim gardłem, ograniczającym rozwój społeczny i gospodarczy. W odpowiedzi na to wiele krajów na świecie aktywnie opracowuje strategie oszczędzania energii i technologii alternatywnych źródeł energii, w tym OZE. Zmniejszenie energochłonności pracujących maszyn i instalacji oraz poprawa efektywności energetycznej wytwarzania energii są uważane za klucz do strategii dekarbonizacji sektora energetycznego i zrównoważonego rozwoju energetycznego [7, 8, 9].

### 2. Dekarbonizacja energetyki

Dekarbonizacja to długofalowy proces redukcji lub eliminacji emisji gazów cieplarnianych. Obejmuje odchodzenie od paliw kopalnych (węgiel, ropa, gaz) na rzecz odnawialnych źródeł energii (OZE) i technologii alternatywnych. Obejmuje również

Artykuł / Article: Nadesłany / Received: 28.03.2026; Zrecenzowany / Revised: 10.04.2026; Zaakceptowany / Accepted: 12.04.2026; Opublikowany / Published: 25.04.2026

Prawa autorskie: © 2026 autorów. Licencjodawca: PZITS. Artykuł w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. / Copyright: © 2026 by the authors. Licensee PZITS. This article is an open access under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

zwiększenie efektywności energetycznej wytwarzania i zużycia energii, elektryfikację oraz modernizację procesów mającą na celu osiągnięcia neutralności klimatycznej [10, 11].

Główne powody rozwijania dekarbonizacji to:

1. Ratowanie klimatu. Spalanie paliw kopalnych uwalnia do atmosfery olbrzymie ilości dwutlenku węgla, tworząc efekt cieplarniany. Nadmiar gazów cieplarnianych w atmosferze powoduje wzrost średniej temperatury planety co prowadzi do ekstremalnych zjawisk pogodowych. Gigantyczne koszty społeczne i finansowe powstają z powodu powodzi, huraganów oraz susz.
2. Kwestie ekonomiczne. W wielu krajach wprowadzane są dodatkowe opłaty za każdą tonę wyemitowanego CO<sub>2</sub> (w UE system ETS). Energia z paliw kopalnych a zwłaszcza z węgla staje się bardzo droga w porównaniu do energii wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych. Obecnie słońce i wiatr to najtańsze sposoby na produkcję prądu.
3. Zdrowie publiczne. Spalanie paliw kopalnych to nie tylko produkcja dwutlenku węgla, którego nie widzimy, ale odczuwamy skutki. Powstają również pyły i związki chemiczne, które czujemy przy każdym oddechu. Służba zdrowia wydaje olbrzymie kwoty na leczenie chorób wywołanych złą jakością powietrza.
4. Bezpieczeństwo energetyczne. Poleganie na energetyce opartej na imporcie ropy i gazu (często z kierunków politycznie niestabilnych) to ogromne ryzyko dla kraju importującego. Oparcie energetyki o OZE lub energetykę jądrową (całkowicie niezależną od aktualnej pogody) daje niezależność energetyczną. W przypadku ataku (wojna, terroryzm) rozproszone źródła energii (zwłaszcza OZE) dają poczucie bezpieczeństwa.

### 3. Obecne i nadchodzące problemy energetyki

Dekarbonizacja przez transformację sektora energetyki już trwa. Obok niewątpliwych korzyści środowiskowych i technologicznych, ujawnia szereg istotnych problemów technicznych, ekonomicznych i społecznych. Problemy te, mające charakter zarówno bieżący, jak i długookresowy, wpływają na stabilność systemów energetycznych, bezpieczeństwo dostaw energii oraz tempo i kierunek dalszej dekarbonizacji. Najważniejszymi problemami energetyki, obecnymi i nadchodzącymi, są [12, 13]:

- Przerwywana praca OZE. Odnawialne źródła energii (OZE) to duża szansa dla ludzkości. Słońce i wiatr mają jedną podstawową wadę, nie gwarantują ciągłości wytwarzania energii. Przy silnych wiatrach oraz dużym nasłonecznieniu powstaje nadprodukcja energii.
- Brak magazynów energii. Do tej pory nie opracowano rozwiązań tanich i masowych sposobów magazynowania energii (baterie to dopiero początek problemu). Istniejące sieci energetyczne są przystosowane do pracy ze źródłami energii o dużych mocach (elektrownie), nie pracują poprawnie z małymi źródłami rozproszonymi.
- Ciepło procesowe. Istniejące OZE są nastawione na produkcję energii elektrycznej, a nie cieplnej. Pewne procesy przemysłowe (produkcja stali, cementu, paliwa czy chemikaliów) wymagają ogromnej ilości ciepła, którego obecnie nie można efektywnie uzyskać z sieci elektrycznej.

- Metale ziem rzadkich. Przez ostatnie kilkanaście lat uprzemysłowiony świat był uzależniony od dostaw ropy i gazu. Rozwój fotowoltaiki oraz układów scalonych doprowadza do uzależnienia świata od metali ziem rzadkich, litu, kobaltu oraz miedzi. Większość zasobów metali ziem rzadkich obecnie kontroluje kilka państw (głównie Chiny). Sytuacja taka może doprowadzić do ryzyka szantażu politycznego.
- Koszty społeczne. Dekarbonizacja to realne zagrożenie dla regionów żyjących z wydobycia węgla czy przemysłu energochłonnego. Jeśli transformacja nie będzie sprawiedliwa, opór społeczny może zatrzymać zmiany polityczne. Wprowadzenie wymagających norm ekologicznych może doprowadzić do przeniesienia tych gałęzi przemysłu do Azji, Afryki lub Ameryki Południowej.

Wciąż decydowana większość energii powstaje ze spalania paliw kopalnych i innych technologii emisyjnych. Tabela 1 zestawia udział dominujących paliw i źródeł energii elektrycznej na świecie oraz jednostkowe emisje gazów cieplarnianych z jej produkcji w 2024 roku. Zestawienie otwiera węgiel kamienny i brunatny, następnie występują gaz ziemny, ropa naftowa i olej opałowy, energetyka jądrowa, hydroenergetyka, energia wiatru, fotowoltaika oraz biomasa i geotermia [1–6].

**Tabela 1.** Udział wybranych źródeł energii elektrycznej oraz jednostkowe emisje gazów cieplarnianych w 2024 roku [1–6]  
**Table 1.** Share of selected electricity generation sources and unit greenhouse gas emissions in 2024 [1–6]

Źródło energii	Udział w produkcji energii elektrycznej – świat [%]	Udział w produkcji energii elektrycznej – UE [%]	Emisja jednostkowa LCA [gCO <sub>2</sub> eq/kWh]
Węgiel (kamienny i brunatny)	35	12	820–1100
Gaz ziemny	23	17	450–500
Ropa naftowa / olej opałowy	2–3	<2	650–750
Energetyka jądrowa	9–10	23–24	5–12
Hydroenergetyka	14–15	14–15	20–30
Energia wiatru	8	18–19	10–12
Fotowoltaika	6–7	10–11	40–55
Biomasa i geotermia	3	2	30–230

### 4. Metody wytwarzania energii elektrycznej

Rozwój gospodarczy świata powoduje wzrost zapotrzebowanie na energię elektryczną. Przewidywany jest 25% wzrost zużycia energii co 10 lat. Rozwój gospodarczy świata powoduje wzrost zapotrzebowanie na energię elektryczną. Podstawowymi źródłami energii pierwotnej są: węgiel, gaz ziemny, ropa naftowa, paliwa jądrowe oraz energia zawarta w roślinach. Wykorzystywana jest również energia wodna, energia geotermalna, wiatrowa oraz słoneczna.

#### 4.1. Energia z paliw kopalnych

Większość energii elektrycznej na świecie jest produkowana ze spalania węgla kamiennego, brunatnego, oleju napędowego lub gazu. Wykorzystywanie paliw organicznych ma niekorzyst-

ny wpływ na środowisko naturalne. Ten ujemny wpływ powstaje w trakcie pozyskiwania surowców energetycznych, w czasie budowy urządzeń energetycznych, a zwłaszcza ich eksploatacji. Spalanie kopaliny organicznej prowadzi do utraty surowców, których użycie inne niż w przemyśle energetycznym może być znacznie korzystniejsze. Spalanie węgla jest jedną z najbardziej zanieczyszczających środowisko metod produkcji energii. Dwutlenek węgla produkowany w wyniku spalania węgla stanowi największy składnik światowych emisji gazów cieplarnianych, odpowiedzialnych za niebezpieczne zmiany klimatyczne [14–16].

Przy stosowaniu węgla jako paliwa należy również uwzględnić następujące szkody: degradację terenu, konieczność składowania dużej ilości odpadów kopalnianych, odprowadzenie zasolonych wód z kopalń, konieczność rozbudowy linii transportowych o dużych możliwościach przesyłowych. W wyniku spalania węgla powstają również: stałe produkty odpadowe (pyły, popioły, żużel), ciekłe produkty odpadowe (wody chłodnicze w elektrowniach) oraz gazowe produkty odpadowe [16].

## 4.2. Elektrownie kondensacyjne

Elektrownie kondensacyjne to elektrownie zawodowe o dużej mocy stosujące kondensacyjne turbiny parowe. Spalanie w kotłach paliwa kopalnego (węgiel, gaz, olej napędowy) służy wytwarzaniu ciepła, które służy do wytworzenia pary napędzającej zespół turbin. Para opuszczająca turbiny jest skraplana w kondensatorze, a następnie w formie kropli wraca do kotła. Sprawność wytwarzania prądu w takiej elektrowni jest niska i wynosi poniżej 40%. Poprawa sprawności osiąga się przez skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Elektrociepłownie, pracujące w systemie skojarzonym (Combined Heat and Power - CHP), wytwarzają energię elektryczną i ciepło w jednym procesie technologicznym, wykorzystującym te same urządzenia i to samo paliwo. Sprawność całkowita CHP sięga nawet 75% [16].

Walka o poprawę sprawności i dekarbonizację węglowych procesów energetycznych doprowadziła do powstania kotłów fluidalnych (FBC – Fluidized Bed Combustion). Jest to rozwiązanie, które umożliwia spalanie paliw gorszej jakości a zarazem zmniejsza poziom zanieczyszczeń. Są bardziej ekologiczne niż tradycyjne kotły np. pyłowe. Przy dodaniu sorbentu (wapń) do paliwa następuje odsiarczanie w złożu, reakcja wiązania siarki bezpośrednio w komorze spalania, co często eliminuje potrzebę budowy kosztownych, zewnętrznych instalacji odsiarczania spalin.

## 4.3. Elektrownie gazowe

Elektrownie gazowe to aktualnie ważny element transformacji światowego i europejskiego energetycznego sektora energetycznego. Uważane są za rozwiązanie pośrednie pomiędzy zanieczyszczającymi środowisko elektrowniami spalającymi paliwa kopalne, a ekologicznymi OZE [17, 18]. Spalanie gazu emituje około 50-60% mniej dwutlenku węgla niż w wypadku węgla. Elektrownię gazową można uruchomić w kilkanaście minut i doprowadzić ją do pełnej mocy nominalnej. W przeciwieństwie do węgla, spalanie gazu praktycznie nie generuje pyłów zawieszonych (PM10, PM2.5) ani tlenków siarki. W energetyce gazowej

stosuje się głównie rozwiązanie znane jako CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), czyli układy gazowo-parowe. Sprawność takiego układu jest bardzo wysoka – przekracza często 60%.

Prawidłowo prowadzony proces spalania gazu w turbinie gazowej nie stwarza dużego zagrożenia dla środowiska. Proces wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o paliwo gazowe jest technologią bezodpadową. Odpady wytwarzane są jedynie w wyniku konieczności utrzymania instalacji w dobrym stanie technicznym. Negatywy stosowania energetyki opartej na gazie są związane głównie z pochodzeniem gazu. Jest on paliwem kopalnym, którego zasoby na kuli ziemskiej są ograniczone i ulegną wyczerpaniu, ze względu na pochodzenie zewnętrzne ceny gazu nie są stabilne i są podatne na zmienną sytuację polityczną oraz dostawy gazu stały się mechanizmem gry politycznej [19].

## 4.4. Elektrownie IGCC

Układy parowo-gazowe, bazujące na tlenowoparowym zgazowaniu paliwa są technologiami energetycznymi gwarantującymi nie tylko istotny wzrost sprawności termicznej, ale również zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i pyłów. W układach IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) tlenowo-parowe zgazowanie węgla, poprzedzające spalanie gazu procesowego przed turbiną gazową, jest traktowane jako ekonomicznie uzasadniona alternatywa w stosunku do bezpośredniego spalania węgla. Głównymi zespołami elektrowni IGCC są: generator zgazowania węgla, instalacje schładzania oraz oczyszczania gazu procesowego, turbina gazowa wraz z turbiną parową z kotłem odzyskowym. Cechą instalacji IGCC jest relatywnie niska emisja trujących składników gazowych oraz pyłu w spalinach. Efektywność układów zgazowania systematycznie rośnie i obecnie elektrownie IGCC osiągają sprawność powyżej 45% (w zależności od jakości węgla).

Po stronie wad należy zaliczyć również wszystkie problemy związane z pozyskiwaniem węgla, czyli ograniczone zasoby (nieodnawialne) węgla, degradację środowiska naturalnego, śmiertelne wypadki w kopalniach, szkody górnicze. Koszt produkcji jednostki energii elektrycznej przewyższa koszty powstające w elektrowniach klasycznych węglowych.

Prowadzone są intensywnie prace nad metodami wytwarzania gazu pozyskiwanego z węgla, bez konieczności wydobywania węgla z pokładów podziemnych. Równocześnie próbuje się połączyć tę metodę z metodami podziemnego magazynowania wytworzonego w procesie spalania dwutlenku węgla, szkodliwego dla środowiska naturalnego.

## 4.5. Elektrownie wodne

Panuje pogląd, że elektrownie wodne są źródłem „czystej” energii, to znaczy, że są mało szkodliwe dla środowiska naturalnego. Podczas wytwarzania energii przez elektrownię wodną do atmosfery faktycznie nie są emitowane żadne zanieczyszczenia. Badania pokazały, że zbiorniki zaporowe mogą być źródłem emisji niebezpiecznego dla środowiska metanu. Zbiorniki elektrowni wodnych uważane są za istotne źródło gazów cieplarnianych, a ilość emitowanego metanu może się znacznie różnić w zależności od lokalnych warunków.

Budowa elektrowni znacząco zmienia środowisko i krajobraz.

Aby uzyskać odpowiednio wysoki poziom wody niezbędny do pracy hydroelektrowni, często trzeba zalać ogromne obszary dolin rzek. Duży zbiornik wodny charakteryzuje się znacznie większym parowaniem i zmienia wilgotność powietrza na stosunkowo dużym obszarze. Pojawiają się lokalne zmiany klimatyczne.

Specyficznym rodzajem elektrowni wodnej, obok przepływowch i zbiornikowych, są układy szczytowo-pompowe. Łączą one w sobie funkcję producenta, konsumenta i ogromnego magazynu energii [20]. Współpracując z systemem energetycznym pozwalają zmagazynować nadmiarową energię elektryczną z OZE lub konieczną do utrzymania wysokiej sprawności bloków energetycznych [21]. W obu wypadkach ich działanie obniża emisję całkowitą z systemu energetycznego.

#### 4.6. Elektrownie wiatrowe

Energia elektryczna uzyskana z elektrowni wiatrowych jest uznawana za ekologiczną, gdyż jest energią odnawialną (OZE), niewymagającą spalania żadnego paliwa. Działaniu siłowni wiatrowych nie towarzyszy żadna emisja zanieczyszczeń. Do zalet energetyki wiatrowej zalicza się nieskomplikowaną budowę urządzeń oraz proste i tanie procedury eksploatacyjne. Do wad należą: uzależnienie pracy elektrowni od występowania wiatru o określonej prędkości, hałas generowany przez pracujące wiatraki, zmiana krajobrazu naturalnego, duże koszty produkcji i budowy elektrowni oraz niezbyt duża moc pojedynczego wiatraka. Rosnący udział energii wiatru w systemie energetycznym, ogranicza wykorzystanie źródeł konwencjonalnych, a tym samym emisję zanieczyszczeń [22, 23].

#### 4.7. Elektrownie słoneczne

Energię słoneczną wykorzystuje się do produkcji energii elektrycznej przy pomocy fotoogniw (energia fotowoltaiczna) oraz do produkcji energii cieplnej (konwersja fototermiczna). Konwersja fotowoltaiczna umożliwia bezpośrednią zamianę energii promieniowania słonecznego (światła) na prąd elektryczny. W trakcie pracy w elektrowniach słonecznych nie powstają żadne emisje, odpady czy hałas. Do zalet elektrowni PV zalicza się dużą niezawodność ogniw słonecznych oraz proste procedury obsługowe i serwisowe. Do wad należą: niemożliwość uzyskiwania energii w warunkach braku oświetlenia, zmienność dobową i sezonową promieniowania słonecznego, konieczność magazynowania wytworzonej energii oraz instalacja ogniw zajmuje duże powierzchnie [24, 25].

#### 4.8. Energia geotermalna

Energia geotermalna (energia geotermiczna, geotermia) należy do odnawialnych źródeł energii wykorzystującą ciepłą energię wnętrza Ziemi. Wykorzystują ją elektrownie i ciepłownie geotermalne. W zależności do parametrów ujęcia geotermalnego ciepła lub gorąca woda lub para wodne mogą być wykorzystywane bezpośrednio w obiegach grzewczych, w systemach wody użytkowej lub systemach turbinowych generacji energii elektrycznej. Często źródła te wymagają szczytowego wspomaganie innymi źródłami energii.

Do zalet energetyki geotermalnej zalicza się niską emisyjność,

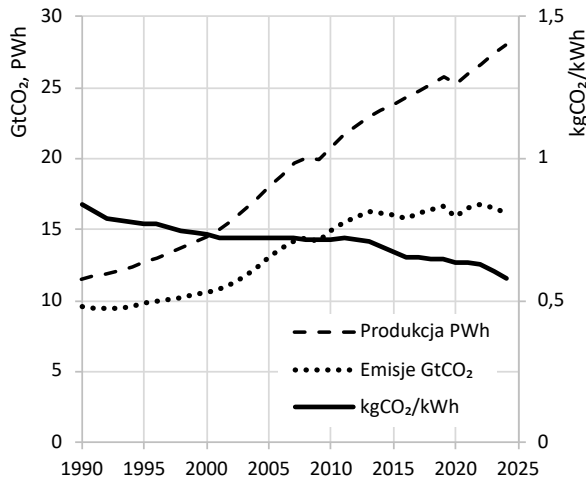
stabilną i ciągłą pracę, wysoką dyspozycyjność źródła, niskie koszty eksploatacyjne i możliwość pracy w układach kogeneracyjnych. Głównymi wadami są ograniczona dostępność lokalizacyjna, wysokie koszty inwestycyjne, niska sprawność konwersji na energię elektryczną, potencjalne oddziaływanie na lokalne środowisko oraz realne ryzyko wyczerpania lokalnych zasobów geotermalnych [26, 27].

#### 4.9. Energetyka jądrowa

Energetyka jądrowa stanowi kluczowe, niskoemisyjne źródło energii [28]. Korzyści wynikające z wprowadzenia energetyki jądrowej to poprawa bezpieczeństwa energetycznego, ciągła praca bez względu na pogodę, możliwość szybkiego dopasowania mocy reaktora do zapotrzebowania sieci elektrycznej, najniższy koszt wytworzenia energii elektrycznej, paliwo może być pozyskiwane z regionów stabilnych politycznie, jego cena nie podlega wahaniom jak gaz i ropa, wspiera spełnienie zobowiązań klimatycznych względem UE, poza produkcją energii elektrycznej technologia dostarcza ciepła procesowego (produkcja wodoru i konwersja węgla na paliwa ciekłe i gazowe i inne). Energetykę jądrową można uznać za technologię przyjazną środowisku z kilku powodów. Rozszczepienie jednego jądra uranu wyzwala energię kilkadziesiąt tysięcy razy większą niż utlenienie w procesie spalania jednego atomu węgla. Z tego powodu eksploatacja, transport i przeróbka rud uranu są znacznie mniej uciążliwe dla ludzi niż wykorzystywanie złóż węgla. Elektrownia jądrowa wytwarza niewielkie ilości odpadów, ale są to groźne substancje promieniotwórcze. Z promieniotwórczych odpadów można odzyskiwać uran i pluton, czyli paliwo jądrowe, jednak jest to produkcja kosztowna, co czynią tylko niektóre kraje z branży. Odpady muszą być przechowywane w sposób nie zagrażający ludziom i środowisku przez czas ich aktywności promieniotwórczej. W perspektywie energetyki jądrowej pojawia się tor zamiast uranu. Tor nie jest paliwem jądrowym, ale można doprowadzić go do tej postaci poddając naświetleniu neutronami. Odpady torowe są zdecydowanie bardziej bezpieczne dla ludzi i środowiska niż odpady uranowe.

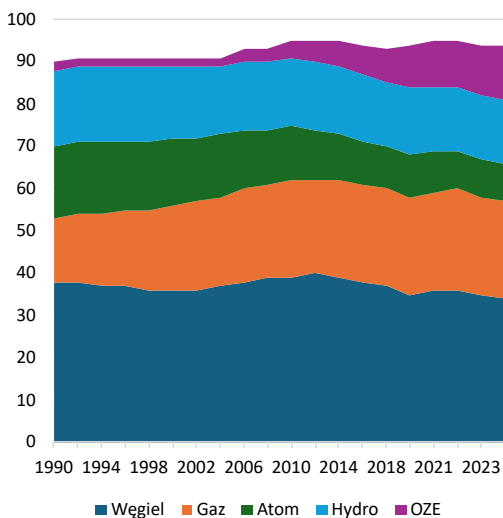
Projekty elektrowni jądrowych są postrzegane jako duże, bardzo drogie a ich budowa trwa wiele lat. W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił wzrost zainteresowania blokami jądrowymi małej i średniej mocy, SMR (Small Modular Reactors) przeznaczonymi do produkcji energii elektrycznej oraz ciepła procesowego [29]. Panuje założenie, że SMR-y będą wytwarzane seryjnie w zakładach produkcyjnych i dostarczane w całości na miejsce docelowe. Przesyłanie ciepła na duże odległości jest ekonomicznie trudne, dlatego budowa elektrowni jądrowej w pobliżu odbiorców ciepła staje się koniecznością. Obecnie pracujące konwencjonalne duże elektrownie jądrowe koncentrują się wyłącznie na produkcji energii elektrycznej marnując ciepło przekazywane do dolnego źródła (rzeka, jezioro, morze). SMR-y będąc obiektami o znacznie mniejszych mocach stwarzają możliwość produkcji ciepła na miejscu, dla celów przemysłowych. Zmniejszony ślad instalacji SMR, lepsze cechy bezpieczeństwa oraz zmieniające się otoczenie regulacyjne sprawiają, że lokalizowanie elektrowni jądrowej bliżej popytu jest bardziej realne niż wcześniej. W efekcie SMR znacząco zwiększają potencjał wykorzystania energii zawartej w paliwie jądrowym. Reaktory modułowe mogą być używane

do wytwarzania energii elektrycznej lub ciepłej znajdującej zastosowanie przy produkcji wodoru, odsalaniu wody morskiej, zasilaniu ciepłowniczych sieci lokalnych oraz innych procesach przemysłowych. Możliwa jest również [kogeneracja] czyli równoczesne wytwarzanie prądu i ciepła w tej samej elektrowni.



**Rys. 1.** Zmiany w światowej produkcji energii elektrycznej, całkowitej emisji CO<sub>2</sub> z produkcji energii elektrycznej oraz jednostkowej emisji CO<sub>2</sub>. W latach 1990–2024 [1–6]

**Fig. 1.** Trends in global electricity production, total CO<sub>2</sub> emissions from electricity production, and specific CO<sub>2</sub> emissions, 1990–2024 [1–6]



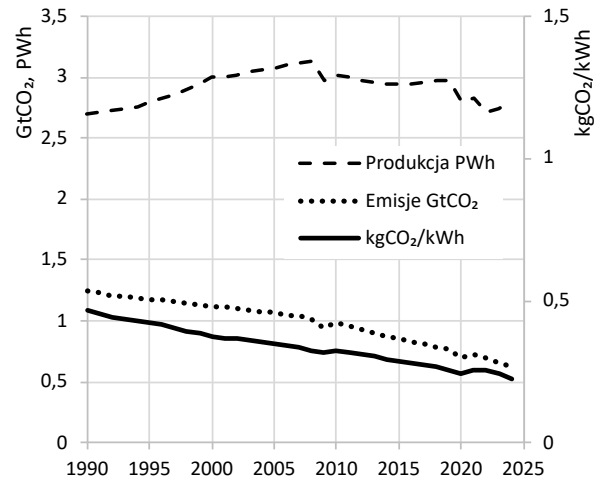
**Rys. 2.** Zmiany w światowych udziałach paliw i źródeł w produkcji energii elektrycznej w latach 1990–2024 [1–6]

**Fig. 2.** Changes in the global shares of fuels and energy sources in electricity generation over the period 1990–2024 [1–6]

## 5. Proces dekarbonizacji

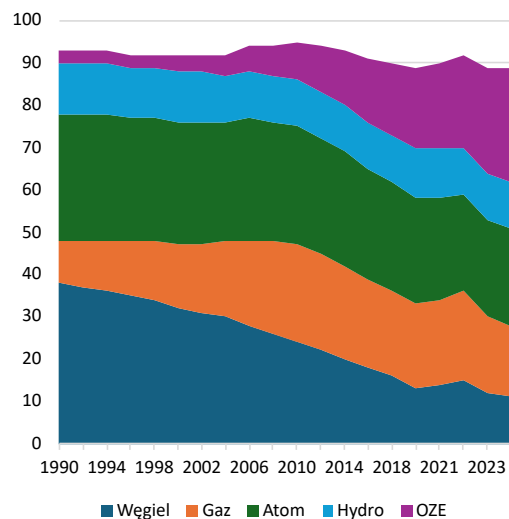
Konkretnych informacji o mechanizmach i tempie dekarbonizacji sektora energetycznego dostarcza analiza danych wieloletnich o wielkości produkcji energii, wielkości towarzyszącej temu emisji oraz jednostkowych emisji (rys. 1–4). Dekarbonizacja energetyki jest procesem długotrwałym i nierównomiernym, a jego tempo zależy od wielu czynników, w tym struktury miksu energetycznego oraz przyjętych polityk klimatycznych. Od 1990

roku globalna produkcja energii elektrycznej nieustannie rośnie, a wraz z nią emisja. Mimo ulepszeń technologicznych i rosnącego udziału OZE emisje z sektora energetyki wciąż pozostają wysokie, głównie ze względu na utrzymującą się dominację węgla i gazu ziemnego. Dopiero w ostatnich latach obserwuje się stopniowy spadek wskaźnika jednostkowej emisji, związany z rosnącym udziałem odnawialnych źródeł energii oraz poprawą sprawności wytwarzania.



**Rys. 3.** Zmiany w produkcji energii elektrycznej, całkowitej emisji CO<sub>2</sub> z produkcji energii elektrycznej oraz jednostkowej emisji CO<sub>2</sub> w Unii Europejskiej. W latach 1990–2024 [1–6]

**Fig. 3.** Trends in global electricity production, total CO<sub>2</sub> emissions from electricity production, and specific CO<sub>2</sub> emissions, 1990–2024 [1–6]



**Rys. 4.** Zmiany w udziałach paliw i źródeł w produkcji energii elektrycznej w Unii Europejskiej w latach 1990–2024 [1–6]

**Fig. 4.** Changes in the shares of fuels and energy sources in electricity generation in the European Union over the period 1990–2024 [1–6]

Odmienne przebieg zmian widoczny jest w Unii Europejskiej. Pomimo utrzymania zbliżonego poziomu produkcji energii elektrycznej, emisje CO<sub>2</sub> z sektora elektroenergetycznego uległy znacznemu zmniejszeniu, co potwierdza skuteczne działania dekarbonizujące. Widoczny jest spadek udziału węgla oraz dyna-

miczny wzrost odnawialnych źródeł energii. Energetyka jądrowa utrzymała względnie stabilną pozycję, pełniąc rolę niskoemisyjnego źródła mocy podstawowej. Efektem tych zmian jest istotne obniżenie średniej jednostkowej emisyjności produkcji energii elektrycznej w UE.

Zestawienia dla Unii Europejskiej pokazują bardziej zaawansowaną transformację energetyczną. W latach 1990–2024 nastąpił wyraźny spadek udziału węgla w produkcji energii elektrycznej oraz szybki wzrost udziału odnawialnych źródeł energii. Energetyka jądrowa, mimo okresowych wahań, pozostaje istotnym, stabilnym i niskoemisyjnym elementem miksu energetycznego UE. Efektem tych zmian jest znaczące obniżenie jednostkowej emisji CO<sub>2</sub> z produkcji energii elektrycznej, przy zachowaniu porównywalnego poziomu jej wytwarzania. Unia Europejska znajduje się na wyraźnie bardziej zaawansowanym etapie dekarbonizacji energetyki niż większość regionów świata.

## 6. Literatura

- [1] Dane statystyczne o światowej produkcji energii elektrycznej z <https://www.statista.com/statistics> (dostęp 7.04.2026).
- [2] Raporty statystyczne *Electricity 2024. Analysis and forecast*, <https://www.iea.org/reports/electricity-2024> (dostęp 7.04.2026).
- [3] Global electricity production by source, <https://www.globalelectricity.org/production-by-source> (dostęp 7.04.2026).
- [4] Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change report, IPCC AR6, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads> (dostęp 7.04.2026).
- [5] Our World in Data – Energy Climate, <https://ourworldindata.org/energy> (dostęp 7.04.2026).
- [6] Eurostat – Energy statistics, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy> (dostęp 7.04.2026).
- [7] Bendigiri, P., Rao, P. (2023). Energy system models: A review of concepts and recent advances using bibliometrics. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 975–1007. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2246082>
- [8] Mancarella, P. (2014). MES (Multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- [9] Kamrat, W. (2023). Development of the Polish energy sector through transformation and harmonization with the European energy and climate policy. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 97(11) 2-11. <https://doi.org/10.15199/17.2023.11.1>
- [10] Ürge-Vorsatz, D., Creutzig, F. (2026). Energy demand and decarbonization in 2025 and beyond. *Nature Reviews Clean Technology*, 2, 4–5. <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00139-w>
- [11] Gürsan, C., de Gooyert, V. (2021). The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110552>
- [12] Mlilo, N., Brown, J., & Ahfock, T. (2021). Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system networks—A review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s40866-021-00123-w>
- [13] Ergun, S., Dik, A., Boukhanouf, R., Omer, S. (2025). Large-scale renewable energy integration: Technical challenges and energy storage solutions. *Sustainability*, 17(3), 1311. <https://doi.org/10.3390/su17031311>
- [14] Lee, S., Kim, J., Tahmasebi, A., Jeon, C.-H., Liu, Y., Yu, J. (2023). Comprehensive technical review of high-efficiency low-emission technologies in advanced coal-fired power plants. *Reviews in Chemical Engineering*, 39(3), 363–386. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0107>
- [15] Melentiev, I. (2023). Techno-economic efficiency estimation of integrated gasification combined-cycle power plants with CO<sub>2</sub> capture. *Clean Technologies*, 5(1), 215–232. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5010013>
- [16] Kamrat, W. (2023). The new investing effectiveness evaluation multi-criteria method in modern supply systems. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 97(10), 10-17. <https://doi.org/10.15199/17.2023.10.2>
- [17] Aguilera, R. F., Aguilera, R. (2019). Revisiting the role of natural gas as a transition fuel. *Energy Policy*, 129, 386–394. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00192-5>
- [18] Boukelia, T. E., Bouhala, A., Cheurfi, Y., Bessaïh, R., Tanougast, A., Hriczó, K. (2026). Comprehensive energy, exergy, economic and environmental assessment of a combined-cycle gas power plant. *Scientific Reports*, 16, 6505. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37499-7>
- [19] Żero, A., & Grządzielski, W. (2026). Sieci gazowe – odrzucona czy niedoceniona wartość dodana transformacji energetycznej. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 100(1), 2-7. <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.01.01>
- [20] Karambelkar, S., Fischer, M., & Ames, S. (2025). Hydropower Reservoir Greenhouse Gas Emissions: State of the Science and Roadmap for Further Research to Improve Emission Accounting and Mitigation. *Sustainability*, 17(13), 5794. <https://doi.org/10.3390/su17135794>
- [21] Yang, W., Zhao, Z., Pérez-Díaz, J. I., Hunt, J. D., Cheng, Y. (2025). Pumped storage hydropower operation for supporting clean energy systems. *Nature Reviews Clean Technology*, 1, 454–473. <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00057-x>
- [22] Sander, L., Jung, C., Schindler, D. (2024). Global review on environmental impacts of onshore wind energy. *Energies*, 17(13), 3098. <https://doi.org/10.3390/en17133098>
- [23] Katzner, T. E., Nelson, D. M., Marques, A. T., Voigt, C. C. (2025). Impacts of onshore wind energy production on biodiversity. *Nature Reviews Biodiversity*, 1, 567–580. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00078-1>
- [24] Vodapally, S. N., Ali, M. H. (2023). A comprehensive review of solar photovoltaic technologies and architectures. *Energies*, 16(1), 319. <https://doi.org/10.3390/en16010319>
- [25] Ahmed, S., Ali, A., Ansari, J. A., Qadir, S. A., Kumar, L. (2025). A comprehensive review of solar photovoltaic systems. *IEEE Access*, 13, 69723–69750. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558539>
- [26] Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023. *Geothermal Energy*, 12, 14. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- [27] Horne, R., Genter, A., McClure, M., Ellsworth, W., Norbeck, J., Schill, E. (2025). Enhanced geothermal systems for clean firm energy generation. *Nature Reviews Clean Technology*, 1, 148–160. <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00019-9>
- [28] Fell, H., Gilbert, A., Jenkins, J. D., Mildenerberger, M. (2022). Nuclear power and renewable energy are both associated with national decarbonization. *Nature Energy*, 7, 25–29. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00964-w>
- [29] Lee, J. I. (2024). Review of small modular reactors: Challenges in safety and economy. *Nuclear Engineering and Technology*, 56, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0>