

Warszawa, dnia 19 kwietnia 2021 r.

Perspektywy dekarbonizacji wytwarzania energii elektrycznej w Polsce.

**Komunikat 03/2021 Interdyscyplinarnego Zespołu
Doradczego ds. Kryzysu Klimatycznego przy Prezesie PAN**

Streszczenie

- (1) Jak pokazują powszechnie akceptowane i świetnie udokumentowane wyniki badań naukowych, ludzkość, chcąc uniknąć najbardziej dramatycznych skutków antropogenicznego ocieplenia klimatu, musi radykalnie obniżyć, w perspektywie 10-letniej o połowę, a docelowo do 2050 roku do zera, emisję gazów cieplarnianych. To zadanie stoi też przed Polską i wynika zarówno z odpowiedzialności za przyszłość następnych pokoleń Polaków i naszej cywilizacji, jak i konieczności wypełnienia zobowiązań międzynarodowych.
- (2) Dekarbonizacja gospodarki dotyczyć musi wszystkich gałęzi gospodarki. W Polsce najpilniejszym zadaniem jest szybka dekarbonizacja produkcji energii elektrycznej, gdyż z powodu dominującej roli węgla największy, bo 45-procentowy udział w emisji gazów cieplarnianych ma sektor energetyczny (średnio w Unii Europejskiej 29%). Transformacja przemysłu energoelektrycznego musi uwzględniać jednak bezpieczeństwo energetyczne kraju i obywateli. Konieczność szybkiego odchodzenia od paliw kopalnych w sektorze energetycznym wynika nie tylko z dbałości o klimat, ale także z przesłanek ekonomicznych (ceny hurtowe energii elektrycznej w Polsce należą do najwyższych) oraz technicznych (znaczna część energetyki węglowej dobiega kresu możliwości eksploatacyjnych). Dekarbonizacja sektora energetycznego musi następować w tempie większym, niż sugeruje to rządowy dokument PEP2040, który zakłada niezrozumiałe ograniczenia dotyczące szybkiego rozwoju energetyki wiatrowej na lądzie i fotowoltaiki. Niezbędna jest też intensyfikacja działań zwiększających oszczędność energii.
- (3) Transformacja energetyczna w Polsce powinna uwzględniać wszystkie nieemisyjne źródła energii, zarówno OZE, jak i energetykę jądrową. Ponieważ energetyka jądrowa dostarczy energii nie wcześniej niż za kilkanaście lat i pokryje tylko część rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, natychmiast należy przyspieszyć budowę farm wiatrowych na morzu, a także odblokować i wesprzeć rozwój najtań-

szego obecnie źródła energii – energetyki wiatrowej na lądzie. Fotowoltaika rozwija się bardzo szybko i jej aktualne wsparcie wydaje się wystarczające. Należy jednak wprowadzić przepisy, które umożliwiłyby mieszkańcom wielorodzinnych budynków i osiedli udział w produkcji energii jako zbiorowych prosumentów, aby w jak najszerszym zakresie włączyć kapitał obywatelski w proces transformacji energetycznej.

- (4) Ponieważ produkcja energii elektrycznej z wiatru i słońca ma zmienny charakter, równoległe do wzrostu mocy tych źródeł niezbędne jest inwestowanie w szczytowe/bilansujące źródła energii i jej magazynowanie, a także możliwość zagospodarowania nadwyżek wyprodukowanej energii. Wśród źródeł szczytowych/bilansujących należy wymienić szczytowe elektrownie gazowe (z możliwością współspalania wodoru), magazyny bateryjne, a także możliwość utrzymania części najnowszych elektrowni węglowych jako rezerwy w wypadku długich niedoborów energii z OZE. W ramach zagospodarowywania nadwyżek energii z OZE system energetyczny powinien być stopniowo wyposażony w elektrolizery do produkcji wodoru, możliwego potem do wykorzystania jako paliwo. Ze względu na okresowość działania, a jednocześnie ważną rolę w bezpieczeństwie energetycznym te elementy systemu energetycznego mogą być nierentowne, dlatego inwestycje w nie, a następnie utrzymanie, muszą mieć wsparcie finansowe wliczane do kosztów systemowych.
- (5) Kluczowe znaczenie będzie miała modernizacja i rozbudowa sieci przesyłowych, w tym przystosowanie ich do zwiększającego się rozproszenia źródeł energii elektrycznej. Powinien to być jeden z priorytetów transformacji energetycznej i koszty tych działań także powinny zostać uwzględnione w kosztach systemowych.
- (6) W polskich warunkach środowiskowych (brak możliwości istotnego rozwoju energetyki wodnej i geotermii, niskie usłonecznienie w chłodnej porze roku i długie okresy bezwietrzne na znacznej części kontynentu europejskiego) istotną rolę w domknięciu dekarbonizacji odegrać powinna energetyka jądrowa. Konieczne są więc systematyczne prace ponad podziałami politycznymi nad jej bezpiecznym rozwojem i budowa społecznego poparcia dla tego rozwiązania.
- (7) Szybka transformacja energetyczna jest szansą na włączenie w proces generowania energii nowych podmiotów i grup społecznych oraz na zrównoważony rozwój lokalny. Jednocześnie będzie ona powodowała wiele napięć społecznych, szczególnie w sektorach i regionach zależnych od energetyki opartej na węglu i górnictwie, a także może skutkować ubóstwem energetycznym wśród niektórych grup społecznych. Ważnym elementem transformacji powinna być odpowiednia polityka zachęcająca do wykorzystania lokalnych szans rozwojowych i łagodząca niepożądane skutki społeczne.

Spis treści

1. Wstęp
2. Stan systemu energetycznego w Polsce na tle Unii Europejskiej
3. Energetyka polska w okresie przejściowym
4. Niskoemisyjne metody produkcji energii elektrycznej – zalety, wady, możliwości
 - 4.1. Fotowoltaika
 - 4.2. Energetyka wiatrowa na lądzie
 - 4.3. Farmy wiatrowe na morzu
 - 4.4. Hydroelektrownie
 - 4.5. Biogazownie
 - 4.6. Biomasa
 - 4.7. Energetyka jądrowa
 - 4.8. Energia geotermalna
5. Rola magazynowania energii w transformacji energetycznej
6. Energetyka a środowisko
 - 6.1. Technologie jądrowe
 - 6.2. Pozostałe technologie
7. Aspekty społeczne transformacji energetycznej
8. Kierunki transformacji na najbliższe lata
9. Konieczność natychmiastowego przyspieszenia dekarbonizacji sektora energetycznego
 - Przypisy
 - Źródła

1. Wstęp

Emitowana do atmosfery wskutek działalności człowieka ilość CO₂ jest ogromna – sięga 38 mld ton rocznie^{i,ii}, o ponad sto razy przewyższając przeciętną emisję powodowaną przez wulkany. Stężenie CO₂ w atmosferze szybko rośnie i przekroczyło już poziom 410 ppm, podczas gdy w okresie preindustrialnym wynosiło zaledwie 277 ppmⁱⁱⁱ. Według specjalnego raportu IPCC z 2018 roku^{iv} doprowadziło to już do wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi o około 1 °C. Podpisane w 2016 roku porozumienie paryskie^v, którego sygnatariuszem jest Polska, wyznaczyło ludzkości cel powstrzymania tego trendu, tak by średnia temperatura powierzchni Ziemi nie wzrosła powyżej 2 °C, a w miarę możliwości – 1,5 °C.

We wspomnianym już raporcie specjalnym IPCC stwierdzono: „W modelowych scenariuszach, w których próg 1,5 °C nie zostaje przekroczony lub zostaje przekroczony w niewielkim stopniu, globalne antropogeniczne emisje CO₂ netto spadną o około 45% do 2030 roku w porównaniu z poziomem z 2010 roku [...], osiągając zero netto około 2050 roku [...]. Scenariusze 1,5 °C charakteryzują się silną synergią z celami zrównowa-

zonego rozwoju (SDG), szczególnie z SDG 3 (zdrowie), 7 (czysta energia), 11 (miasta i społeczności), 12 (odpowiedzialna konsumpcja i produkcja) i 14 (oceany). Niektóre scenariusze 1,5°C, przy braku starannego zarządzania, mogą prowadzić do kompromisów pomiędzy ograniczeniem emisji a SDG: 1 (ubóstwo), 2 (głód), 6 (woda) i 7 (dostęp do energii)”.

W krajach rozwiniętych produkcja energii elektrycznej, podstawa dla zapewnienia dobrobytu społeczeństw, jest odpowiedzialna za około 1/3 emisji CO₂^{i,vi,vii}, w Unii Europejskiej z Wielką Brytanią za 29%^{vii}, a w Polsce aż za 45%^{viii}. Ponadto znaczenie elektroenergetyki będzie rosło w miarę rugowania paliw kopalnych z ogrzewnictwa, transportu, rolnictwa i innych sektorów, co jest niezbędne do osiągnięcia neutralności klimatycznej. Z tego powodu transformacja energetyczna w kierunku niskoemisyjnych (tabela 1) źródeł energii jest kluczowa dla zapewnienia bezpieczeństwa klimatycznego.

Odejście od paliw kopalnych w wytwarzaniu energii elektrycznej jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym do zapobieżenia katastrofie klimatycznej. Konieczna jest też dekarbonizacja transportu, ogrzewania i przemysłu. Niezbędny jest też znaczny postęp w energooszczędności. Te zagadnienia będą rozpatrywane w innych komunikatach.

Przy rozpatrywaniu możliwych scenariuszy przemian w sektorze wytwarzania energii elektrycznej istotna jest świadomość, że:

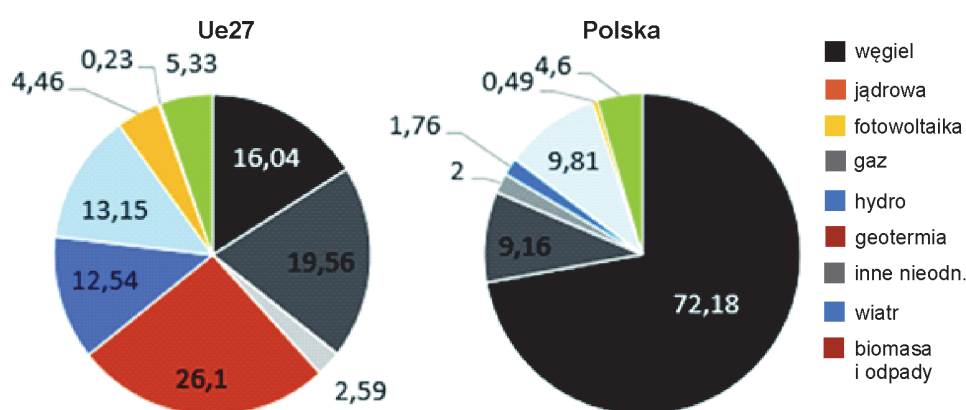
- 1) nie jest możliwe produkowanie energii elektrycznej bez wpływu na środowisko, szkodliwość tego wpływu należy minimalizować;
- 2) nie ma źródeł energii, które zupełnie nie emitowałyby gazów cieplarnianych (emisja powstaje choćby przy produkcji i transporcie turbin wiatrowych czy paneli fotowoltaicznych), a są jedynie niskoemisyjne, które często umownie nazywamy bezemisyjnymi, takie jak większość OZE i energetyka jądrowa;
- 3) najskuteczniejszym sposobem ograniczania emisji jest energooszczędność;
- 4) nie ma jednej najlepszej metody bezemisyjnej produkcji energii elektrycznej, każda z nich ma zalety i wady, a ponadto mogą i powinny się one uzupełniać tak, aby emisyjność i szkodliwość dla środowiska całego miksu energetycznego były jak najmniejsze;
- 5) transformacja sektora wytwarzania energii elektrycznej musi być przeprowadzana w taki sposób, by zachowana była stabilność dostaw energii elektrycznej zarówno pod względem jej ilości, jak i jakości;
- 6) wiele technologii koniecznych do redukcji emisyjności jest w bardzo wstępnych fazach rozwoju, nieznanym jest możliwy stopień ich implementacji na wielką skalę w krótkim czasie, w jakim musimy zredukować emisje, a niektóre rozwiązania naukowo możliwe, takie jak energetyka termojądrowa, nie odegrają żadnej roli w obecnej transformacji energetycznej ze względu na słabe zaawansowanie prac.

Tabela 1. Emisja gazów cieplarnianych wybranych technologii wytwarzania energii elektrycznej w g CO₂eq¹, na 1 kWh (mediana). Emisja w cyklu życiowym obejmuje dodatkowo emisje metanu i efekt albedo. CCGT – turbiny gazowo-parowe². Emisje bezpośrednie przy pozyskiwaniu energii z biomasy zależą od składu biomasy, odległości między miejscem jej wyprodukowania a elektrownią, a także wydajności elektrowni. Według raportu IPCC 2018^{iv}

| Technologia | Emisje bezpośrednie | Infrastruktura i łańcuch dostaw | Emisja w cyklu życiowym |
|--|---------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Elektrownie węglowe | 760 | 9,6 | 820 |
| Elektrownie gazowe (CCGT) | 370 | 1,6 | 490 |
| Elektrownie jądrowe | 0 | 18 | 12 |
| Biomasa – współspalanie (OZE) | różnie | – | 740 |
| Biomasa – dedykowane uprawy i instalacje OZE) | różnie | 210 | 230 |
| Energetyka wodna (OZE) | 0 | 19 | 24 |
| Fotowoltaika na dachach (OZE) | 0 | 42 | 41 |
| Fotowoltaika – farmy (OZE) | 0 | 66 | 48 |
| Wiatr na lądzie (OZE) | 0 | 15 | 11 |
| Wiatr na morzu (OZE) | 0 | 17 | 12 |
| Elektrownie węglowe z wychwytem i składowaniem CO ₂ | 120 | 28 | 220 |
| Elektrownie gazowe (CCGT) z wychwytem i składowaniem CO ₂ | 57 | 8,9 | 170 |

2. Stan systemu energetycznego w Polsce na tle Unii Europejskiej

Polski sektor elektroenergetyczny, oparty na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego, jest jednym z najbardziej emisyjnych w skali Europy i świata (ryc. 1).



Ryc. 1. Udział różnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w 2019 roku w Unii Europejskiej (bez Bułgarii, Cypru i Malty) i Polsce (wg Międzynarodowej Agencji Energetycznej IEA^{viii})

Emisja na jednostkę wytwarzanej energii elektrycznej była najwyższa w Europie, trzykrotnie wyższa niż średnia unijna i wynosiła 724 g CO₂ na kWh. Dla porównania wskaźnik jednostkowej emisji najniższy był w Szwecji (13) oraz we Francji (55 g CO₂/kWh).

Transformacja energetyczna wymaga poniesienia kosztów, a jej celem jest ochrona klimatu i środowiska, przy jednoczesnym zapewnieniu odbiorcom ciągłego dostępu do energii elektrycznej na warunkach dających najlepsze możliwości rozwoju. Dlatego warto analizować koszty wygenerowania energii elektrycznej z różnych źródeł. Przykładowo, jak pokazuje ryc. 2, koszt energii elektrycznej pozyskanej z węgla jest wyższy niż z OZE. Jednak warunek zapewnienia ciągłości dostaw energii powoduje, że korzystanie ze źródeł OZE zależnych od warunków atmosferycznych, w szczególności od siły wiatru i nasłonecznienia, przynosi dodatkowe koszty (czego na ryc. 2 nie uwzględniono). Najczęściej koszty te nazywa się „kosztami zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego” (lub „kosztami systemowymi”); ich szacowanie jest zadaniem bardzo trudnym. Trudną sytuację Polski potwierdza ryc. 3, przedstawiający udział źródeł emisyjnych (A) i bezemisyjnych (B) w produkcji energii elektrycznej w poszczególnych krajach Unii Europejskiej.

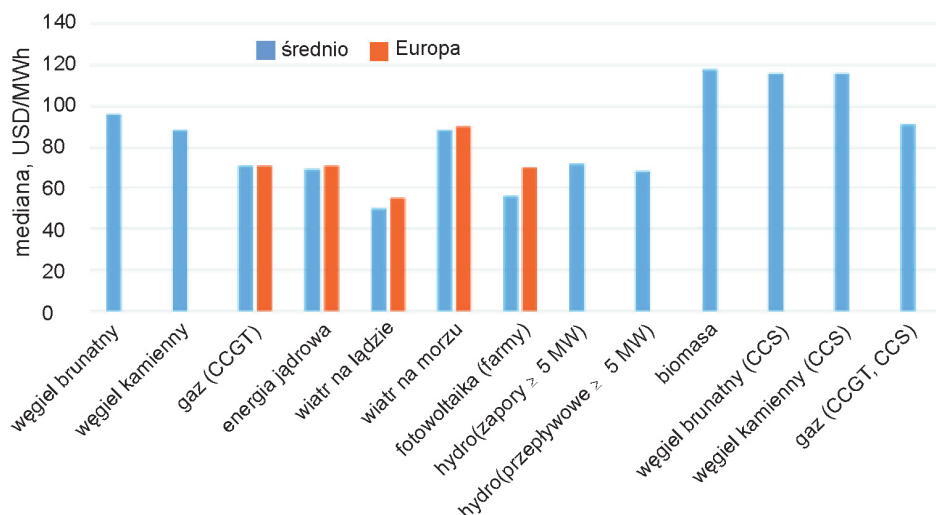
3. Energetyka polska w okresie przejściowym

Pracujące obecnie jednostki wytwórcze w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) to przede wszystkim bloki parowe spalające węgiel kamienny i brunatny. Na koniec 2019 roku były one odpowiedzialne za pokrycie blisko 73% zapotrzebowania na energię elektryczną^{viii}. Jednocześnie 6,6% zapotrzebowania było zaspokajane importem netto^{viii}. Ponieważ jednostki wytwórcze spalające węgiel są w pełni dyspozycyjne, stanowią one obecnie podstawę bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Większość bloków na węgiel została wybudowana w latach 1965–1985 i znacząca ich część przekroczyła projektowy czas pracy, zatem niezależnie od wymagań ochrony klimatu zbliża się konieczność ich wyłączenia i zastępowania nowymi jednostkami wytwórczymi. Przewiduje się, że po roku 2040 zostanie w ruchu tylko kilka nowoczesnych i najmniej emisyjnych jednostek węglowych oddanych do użytkowania w ostatnich kilku latach. Naturalne jest zatem pytanie: co w zamian? Nawet planowany aktualnie rozwój energetyki jądrowej i niedyspozycyjnej wiatrowej na morzu nie może skompensować skali koniecznych wyłączeń.

Z perspektywy potrzeby uzyskania neutralności klimatycznej w 2050 roku konieczny jest intensywny rozwój źródeł wytwórczych wykorzystujących nieemisyjne źródła energii, przede wszystkim wiatr i słońce, co wymaga docelowo rozwiązania problemu magazynowania energii i szybkiego bezemisyjnego uzupełniania niedoboru energii z tych źródeł. To jednak, podobnie jak produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych, jest dość odległą perspektywą i przez jeszcze minimum kilkanaście lat ko-

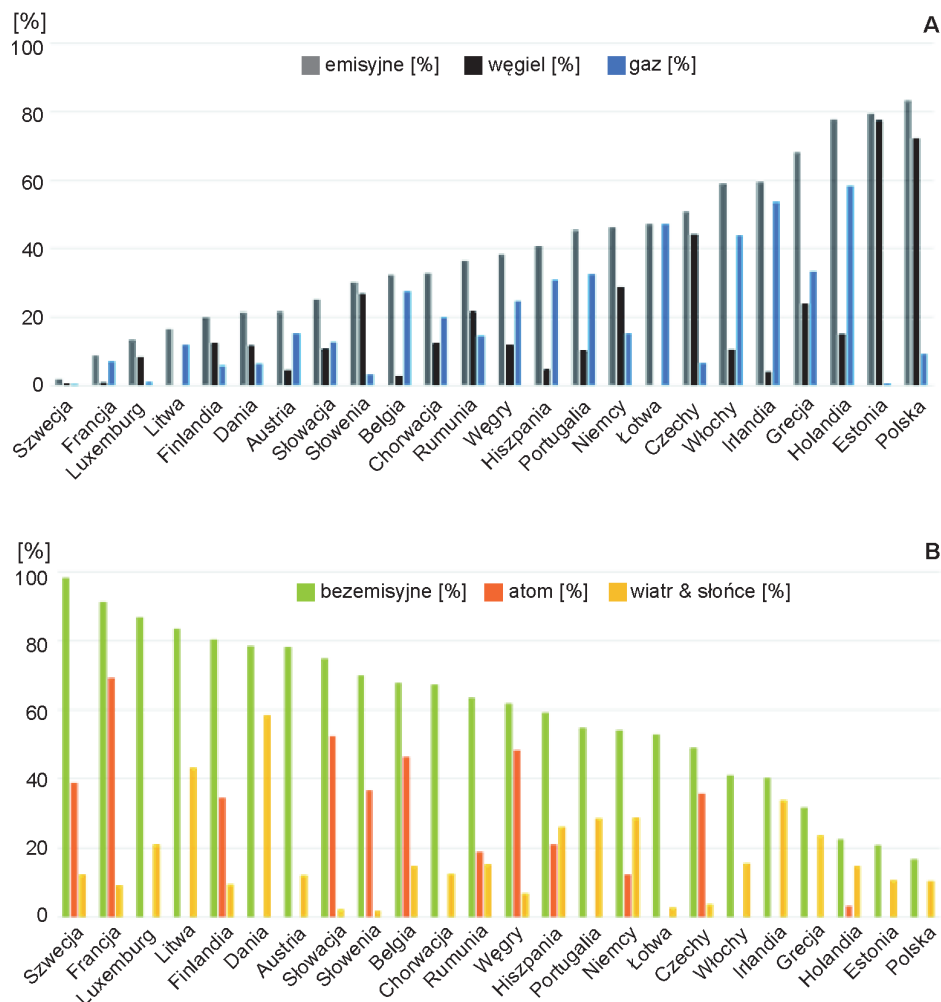
nieczne będzie wykorzystywanie elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne. Elektrownie te będą pełniły rolę regulacyjną i bilansującą zapotrzebowanie z wytwarzaniem.



Ryc. 2. Koszt wygenerowania energii z różnych źródeł, z uwzględnieniem kosztów inwestycyjnych i kapitałowych oraz przewidywanego okresu pracy w 2020 roku. Są to tzw. koszty inwestorskie (LCOE), nieuwzględniające kosztów systemowych. W przeciwieństwie do energii jądrowej i energii z paliw kopalnych, energia ze słońca i wiatru jest nie zawsze dostępna i musi być w przypadku niedoboru zastępowana innymi źródłami lub importem, co generuje dodatkowe koszty systemowe. Słupki niebieskie to średnia dla 24 krajów z różnych kontynentów. Skrót CCS oznacza wychwytywanie i magazynowanie CO₂. Dane według raportu IEA^{ix}

Jednym z możliwych (prawdopodobnie nieuniknionym) rozwiązaniem jest wykorzystanie do bilansowania jednostek wytwórczych zasilanych gazem ziemnym. Od roku 2018 pracują w polskim systemie elektroenergetycznym wydajne turbiny gazowo-parowe (CCGT *combined cycle gas-turbine*²) o łącznej mocy około 2 GW. Ich podstawowe zalety to niższa emisyjność w porównaniu do elektrowni węglowych (tabela 1), a co za tym idzie niższe koszty wytwarzania energii elektrycznej w warunkach konieczności zakupu uprawnień do emisji CO₂, niższe jednostkowe koszty budowy oraz krótszy okres życia, co pozwoli w pełni je zamortyzować do 2050 roku. Ważne jest też, że można w nich spalać mieszaninę gazu ziemnego i wodoru. Wadą jest stosunkowo wysoka emisyjność i uzależnienie od dostaw kolejnego paliwa kopalnego – gazu ziemnego.

Z punktu widzenia uzupełniania produkcji energii elektrycznej w sytuacji braku wiatru i słońca bardziej atrakcyjne są turbiny gazowe (OCGT *open cycle gas-turbine*²). Są wprawdzie mniej wydajne niż turbiny gazowo-parowe, ale prostsze i tańsze w budowie, i co najważniejsze, w miarę potrzeby bardzo szybko się je uruchamia (około 10 minut). W okresie najbliższych kilkunastu lat rozwój energetyki opartej na wietrze i słońcu w połączeniu z energetyką gazową może zbilansować podaż i popyt.



Ryc. 3. A – Udział źródeł emisyjnych, z wyróżnieniem węgla i gazu ziemnego i B – emisyjnych (łącznie OZE i atom), z wyróżnieniem energetyki jądrowej i energii z wiatru i słońca, w produkcji energii elektrycznej w poszczególnych krajach Unii Europejskiej w 2019 roku. Pominięto Luksemburg, Litwę i Łotwę, gdyż importują one ogromną większość energii. Wykres sporządzono na podstawie danych IEA^{viii}. Udział energetyki opartej na gazie ziemnym jest istotny, gdyż dobrze współpracuje ona, w przeciwieństwie do energetyki węglowej, z niestałymi źródłami, takimi jak wiatr i słońce. Udział energetyki jądrowej jest istotny, gdyż jest to stabilne bezemisyjne źródło energii

Nie wyklucza to udziału energetyki jądrowej w docelowym mieszkaniu energetycznym. Należy również rozważyć wariant, w którym część wycofywanych z regularnej pracy elektrowni węglowych nie byłaby likwidowana, lecz stanowiłaby rezerwę niezbędną przy długotrwałych i głębokich niedoborach energii z OZE^x. Pozwoliłoby to ograniczyć, choć

nie zlikwidować, inwestycje w elektrownie gazowe. Koszty utrzymania takiej rezerwy stanowiłyby koszty systemowe.

4. Niskoemisyjne metody produkcji energii elektrycznej – zalety, wady, możliwości

4.1. Fotowoltaika

Jest to najszybciej rozwijający się sektor produkcji energii elektrycznej w Polsce. Koszt jej generowania jest stosunkowo niski (ryc. 2), a urządzenia ją wytwarzające są niemal bezobsługowe. Źródła mogą być rozproszone (energetyka prosumencka) lub skoncentrowane. Można łatwo i stopniowo zwiększać moc zainstalowaną przez rozbudowę instalacji. Podstawową wadą jest zmienność produkcji, zarówno w cyklu dobowym, jak i rocznym (zmienność przewidywalna), oraz zmienność uzależniona od zachmurzenia (nieprzewidywalna). Instalacje fotowoltaiczne pracują w Polsce średnio z mocą wykorzystującą ok. 11% mocy maksymalnej (tzw. mocy zainstalowanej)^{xi,xxii}, przy braku uzysku energii nocą, niewielkich uzyskach zimą i znacznych za dnia latem (co ma znaczenie ze względu na rosnącą popularność klimatyzacji). Nadmierny udział tego sektora produkcji energii w krajowym miksie energetycznym wymagałby jednak ogromnych nakładów na magazynowanie energii. Ponadto skoncentrowana fotowoltaika, dająca dużą moc, musi zajmować przestrzeń, co stawia ograniczenia lokalizacyjne wynikające z konieczności minimalizacji wpływu na środowisko.

4.2. Energetyka wiatrowa na lądzie

Jest to źródło taniej energii (ryc. 2) wymagające sporych nakładów finansowych na etapie budowy. W pewnym stopniu uzupełnia fotowoltaikę (wiatr może wiać we wszystkich porach dnia i roku), jednak jest również zależne od pogody. W Polsce występują okresy ze słabymi wiatrami, wtedy produkcja energii jest znikoma, czasem w okresach tygodniowych. Ze względu na warunki meteorologiczne turbiny wiatrowe pracują w Polsce średnio w ciągu roku z mocą równą 35% mocy zainstalowanej^{xi,xxiii}, z nieco większymi uzyskami w chłodnej porze roku.

4.3. Farmy wiatrowe na morzu

Farmy morskie offshore pozwalają na osiągnięcie dużych mocy w sposób mniej zmienny niż nad lądem. W warunkach polskich farmy wiatrowe na morzu powinny pracować średnio z mocą równą nawet 45% mocy zainstalowanej^{xi,xxiii}, z mniej licznymi niż na lądzie długimi okresami niewielkiej produkcji. Podstawową wadą są koszty, dwukrotnie wyższe niż w przypadku farm wiatrowych na lądzie (ryc. 2), a ponadto długi okres realizacji inwestycji, znacznie trudniejszych technicznie na morzu niż na lądzie.

4.4. Hydroelektrownie

Niestety jesteśmy krajem ubogim w wodę, w większości nizinnym. Nasz potencjał produkcji energii elektrycznej z tego źródła (około 1,8% w 2019 roku) jest w zasadzie

wyczerpany. Szereg elektrowni wodnych działa jako elektrownie szczytowo-pompowe, co ciągle jest jedynym możliwym sposobem magazynowania energii na większą skalę. Jest wielu zwolenników lokalnego rozwijania małej energetyki wodnej. Należy jednak podchodzić do tego z dużą ostrożnością ze względu na skutki przyrodnicze i konieczność renaturalizacji rzek i cieków wodnych dla wzrostu retencji środowiskowej.

4.5. Biogazownie

Jest to potencjalnie stabilne źródło produkcji energii elektrycznej, jednak przy dość wysokich kosztach. Biogazownie mają największy sens, jeśli będą spełniać też inne funkcje poza produkcją energii – unieszkodliwianie odpadów z produkcji rolniczej i przemysłu spożywczego oraz odchodów zwierząt hodowlanych, zagospodarowanie gazu ze składowisk odpadów, fermentacja osadów z oczyszczalni ścieków. Ze względu na ograniczony potencjał biogazownie nie będą odgrywać zasadniczej roli w transformacji energetycznej, choć są ważnym jej elementem.

4.6. Biomasa

Spalanie biomasy było w 2019 roku odpowiedzialne za wyprodukowanie 4,6% energii elektrycznej w Polsce^{viii}. Jest to mocno kontrowersyjne źródło energii, a jego emisyjność może być duża, zależnie od sposobu pozyskiwania, transportu i wartości energetycznej (tabela 1). Przy spalaniu drewna kontrowersyjne jest uznanie biomasy za źródło odnawialne, przynajmniej w krótkich (mniej niż 100 lat – charakterystyczny czas wzrostu drzew) skalach czasu.

4.7. Energetyka jądrowa

Nieocenionymi zaletami tego źródła energii są: stabilność pracy (średnio w ciągu roku wykorzystują moc maksymalną, czyli zainstalowaną, w 80-90%)^{xi,xxii}, długi czas pracy (co najmniej 60 lat), niska cena pozyskiwanej energii i dyspozycyjność produkcji energii przy równoczesnej bezemisyjności. Przeszkodą w jej rozpowszechnieniu są bardzo wysokie koszty inwestycyjne oraz kontrowersje wobec potencjalnych kosztów zamknięcia elektrowni i przechowywania odpadów. Chociaż energetyka jądrowa pochłonęła w przeliczeniu na ilość wyprodukowanej energii o kilka rzędów wielkości mniej ofiar niż najniebezpieczniejsza energetyka węglowa (jeśli uwzględnimy wypadki w kopalniach)^{xii}, jest ona często postrzegana jako niebezpieczna. Dlatego wymagane jest prowadzenie stałego dialogu ze społeczeństwem, przedstawianie jej zalet i rzetelnej informacji o jej wadach. Wprawdzie podjęto decyzję o budowie elektrowni jądrowych w Polsce, ale decyzja o wyborze dostawcy zapadnie nie wcześniej niż za rok, a cykl przygotowania inwestycji i budowy jest długi. Według oficjalnych komunikatów^{xi,xxii} pierwsza energia elektryczna powinna popłynąć z elektrowni jądrowej w 2033 roku, o ile nie będzie opóźnień. Na globalnym rynku dziś dostępne są jedynie reaktory dużej mocy spełniające bardzo wysokie standardy bezpieczeństwa. Wszystkie projekty takich reaktorów III ge-

neracji są do siebie podobne, ale aktualnie kontrakty na budowę nowych bloków energetycznych mają jedynie firmy rosyjskie i chińskie. Jeśli ze względów geopolitycznych odrzucimy ich oferty, alternatywą są jedynie reaktory francuskie i amerykańskie i być może koreańskie. Niestety wybudowano lub buduje się jedynie po kilka bloków energetycznych według tych projektów (jedna w USA została trwale porzucona), a inwestycje mają duże opóźnienia i koszty znacznie przekraczające założenia. Oznacza to, że każdy z tych projektów niesie za sobą znaczne ryzyko, choć sytuacja może szybko ulec zmianie, o ile wzrosnie przekonanie że rozwój energetyki jądrowej jest istotny dla osiągnięcia neutralności klimatycznej. Równocześnie rozwijana jest w wielu krajach technologia małych modułowych elektrowni jądrowych (SMR), skalowalnych i wyposażonych w pełni pasywne (oparte na prawach fizyki) systemy bezpieczeństwa. Nie są to jeszcze technologie w pełni dojrzałe, jednak, podobnie jak technologie wodorowe, powinny być rozważane w perspektywie przyszłego miks energetycznego.

4.8. Energia geotermalna

Parametry i zasoby energii geotermalnej dostępnej w Polsce praktycznie wykluczają jej zastosowanie w produkcji elektryczności, co nie znaczy, że lokalnie nie może ona odegrać pewnej roli w energetyce ciepłej.

5. Rola magazynowania energii w transformacji energetycznej

Ze względu na rosnącą rolę energetyki wiatrowej i słonecznej, gdzie produkcja energii jest zmienna w cyklach dobowych i rocznych oraz uzależniona od pogody, coraz pilniejszym staje się rozwój magazynowania energii. Jednym z obiecujących rozwiązań tego problemu jest wykorzystanie wodoru. Najpewniej odegra on też ogromną rolę w procesach dekarbonizacji gospodarki i transportu.

Dla tzw. gospodarki wodorowej znaczenie ma zarówno etap wytwarzania wodoru (wodór nie jest paliwem czerpalnym wprost z zasobów przyrody), jak i jego magazynowania, transportu i konwersji do pożądanych postaci energii (głównie elektryczności i energii mechanicznej oraz nowych paliw). Wszystkie z nich są istotne dla końcowej efektywności techniczno-ekonomicznej i ekologicznej. Obecnie pozyskuje się wodór prawie wyłącznie z paliw kopalnych, ale dla osiągnięcia neutralności klimatycznej technologie te musiałyby być połączone z wychwytem i magazynowaniem CO₂. Zatem najbardziej obiecującą technologią jest elektrolityczny rozkład wody na wodór i tlen. Obecnie technologia ta jest droga i wykorzystywana jedynie do produkcji najczystszeo wodoru, powinna jednak radykalnie potanieć dzięki postępowi technologicznemu i wykorzystywaniu okresowych nadwyżek w produkcji energii z wiatru i słońca (ewentualnie także z elektrowni jądrowych w okresie niskiego zapotrzebowania na energię).

Obecne przepisy ograniczają rozwój przemysłu czystego wodoru. Brakuje na przykład międzynarodowej normy bezpieczeństwa transportu i przechowywania dużych

ilości wodoru, brak też jest danych na temat wpływu różnych technologii wodorowych na środowisko.

Jedynym dostępnym obecnie w Polsce sposobem magazynowania energii na masową skalę są elektrownie szczytowo-pompowe. Zapas energii w tych elektrowniach wystarcza na kilka (4–6) godzin pracy z mocą znamionową, która w skali kraju wynosi łącznie niemal 1800 MW^{xiii}. Daje to produkcję około 7200–10800 MWh, równą mniej więcej godzinnej różnicy między minimalnym a maksymalnym zapotrzebowaniem na energię w ciągu doby lub równoważną 3–5 godzinom obecnej przeciętnej produkcji energii z wiatru. Przeciętny koszt tego sposobu magazynowania energii wynosi tylko 165 \$/kWh^{xv}, jednak koszt początkowy w fazie inwestycji jest wysoki, budowa trwa długo i niewiele jest możliwych lokalizacji dla nowych inwestycji.

Przyszła możliwość to magazyny bateryjne. W chwili obecnej dojrzałą technologią są ogniwa litowo-jonowe. Typowa moc takich magazynów to od 1 kW do 100 MW, a pojemność poniżej 200 MWh. Ze względu na to, że w jednostce objętości takich ogniw można zgromadzić niewiele energii (tzw. gęstość energii wynosi 200–400 Wh/dm³)^{xiv}, trudno wyobrazić sobie je jako masowe magazyny energii. Mogą natomiast pełnić ważną rolę w stabilizacji sieci przy chwilowych spadkach produkcji z wiatru lub słońca. Koszt tej technologii to 469 \$/kWh w 2018 roku, a prognoza na 2025 rok to 362 \$/kWh^{xv}. Całocyciowa liczba cykli ładowań-rozładowań to 3500 dla baterii Li-Ion, znacznie więcej niż dla tańszych kwasowych akumulatorów ołowiowych (900)^{xv}.

Technologią bardzo obiecującą są baterie przepływowe. Składają się one z jednostki lub baterii jednostek odpowiedzialnych za ładowanie lub rozładowywanie elektrolitu i zbiorników elektrolitu przepływającego przez te jednostki w celu ładowania lub rozładowywania. Pojemność takiego układu można rozbudowywać poprzez powiększanie zbiorników elektrolitu, natomiast moc przez rozbudowywanie jednostek ładujących/rozładowujących. Typowa moc takich układów to od kilku kW do 30 MW, a pojemność od 100 kWh do 120 MWh, z potencjałem do dalszego powiększania. W roku 2018 była to technologia droższa (850 \$/kWh), z perspektywą spadku do 650 \$/kWh w 2025 roku^{xv}. Całocyciowa liczba cykli ładowań-rozładowań to 10 000^{xv}. Obiecującą technologię stanowią bateryjne układy hybrydowe, łączące efekty synergii różnych baterii, oraz systemy zarządzania tak otrzymaną energią.

W przypadku wszelkich układów bateryjnych czas reakcji jest bardzo krótki, rzędu sekund. Dlatego takie układy mogą stanowić pierwszą linię obrony przy braku zbilansowania podaży i popytu, zanim zostaną uruchomione inne mechanizmy, takie jak uruchomienie elektrowni szczytowo-pompowych (pojedyncze minuty), szczytowych elektrowni gazowych (ok. 10 minut), a w przyszłości elektrowni wodorowych. Bateryjne systemy magazynowania będą odgrywać rosnącą rolę w miarę rozwoju energetyki opartej na OZE. Ponieważ nie są one tanie, będą stanowić istotny koszt transformacji.

Warto jeszcze wspomnieć o superkondensatorach. Przy mocy 250 kW do 2 MW i pojemności 2,5 do 25 kWh nie mają one potencjału stać się masowymi magazynami energii, ale ich zaletą jest bardzo długa żywotność, a przede wszystkim błyskawiczne uruchamianie, w czasie $0,016 \text{ s}^{\text{XV}}$. Potencjalnym ich zastosowaniem jest kompensacja sekundowych wahań napięcia w sieci.

W krajach z dużym udziałem zależnych od pogody źródeł energii jej magazynowanie jest teraz najważniejszym wyzwaniem. Należy zatem spodziewać się szybkiego postępu technologicznego, jednak ograniczenia natury fizycznej w tym zakresie są poważne, a perspektywy wielkoskalowego długookresowego magazynowania znacznych ilości energii niepewne ze względu na niedojrzałość technologii wodorowych. Transformacja sektora energetycznego w Polsce powinna uwzględniać magazynowanie energii już teraz, a nie dopiero wtedy, gdy pojawią się poważne zaburzenia w dostawach energii elektrycznej. Konieczna jest też w wypadku masowego rozwoju technologii z tego zakresu ocena ich wpływu na środowisko.

6. Energetyka a środowisko

W przypadku wszystkich źródeł energii należy pamiętać zarówno o wpływie na środowisko w okresie eksploatacji, jak i recyklingu po zakończeniu eksploatacji.

6.1. Technologie jądrowe

Zaletą energetyki jądrowej w oddziaływaniu na środowisko jest przede wszystkim brak emisji CO_2 , NO_x , O_3 , pyłów i innych substancji. Emisja hałasu podczas normalnej pracy elektrowni jądrowej nie przekracza dopuszczalnych norm w odległości 350 m od źródeł hałasu, a związana jest głównie z pracą chłodni kominowych.

Analizy wpływu energetyki jądrowej na środowisko są prowadzone od dziesięcioleci i w krajach wykorzystujących tę technologię wypracowano szereg standardów, precyzyjnie określono stawiane wymagania. Zagrożenia radiacyjne występujące w trakcie normalnej eksploatacji elektrowni jądrowych są niemal całkowicie wyeliminowane, gdyż dopuszczalne limity uwolnień radioaktywności do środowiska są bardzo niskie, a rozwiązania techniczne gwarantujące ich spełnienie są bardzo skuteczne i niezawodne. Zagrożenia mogą wystąpić w warunkach awaryjnych, a katastrofa w Fukushima pokazała ich realny wymiar. Należy podkreślić, że w wyniku tej katastrofy, wywołanej trzęsieniem ziemi i tsunami, które zniszczyły też inne obiekty infrastruktury, doszło do skażeń radioaktywnych otoczenia, ale ryzyko całkowitej dawki dla ludności zamieszkałej w pobliżu elektrowni nie przekroczyło kilkudziesięciu milisiwertów, a typowo były mniejsze niż dwadzieścia milisiwertów, co jest równoważnością dwóch badań rentgenowskich lub kilkugodzinnego lotu samolotem pasażerskim. Podjęte decyzje o przemieszczeniu ludności zmniejszyły te i tak niskie ryzyka radiacyjne, powodując jednak wiele innych perturbacji. Warto też podkreślić, że obecnie pozwolenie na budowę mogą uzyskać jedynie

reaktory generacji trzeciej, które zapewniają brak skażeń środowiska nawet po tak wielkiej katastrofie naturalnej.

Nawet w najkrótszej analizie wpływu energetyki jądrowej na środowisko szczególną uwagę należy zwrócić na duży pobór wody do chłodzenia w warunkach normalnej eksploatacji. Dlatego poszukiwane są możliwości wdrożenia suchego chłodzenia, co jest częścią niektórych programów rozwoju SMR. Decydując się na wdrożenie energetyki jądrowej, należy również pamiętać o konieczności zapewnienia składowania i przetwarzania zużytego paliwa; w tym obszarze wysokie standardy ograniczenia wpływu na środowisko wdrażane są w Finlandii. Zużyte paliwo corocznie wyładowywane z typowego dużego reaktora, o mocy rzędu 1000 MWe, zawiera ok. 300 kg izotopów rozszczepialnych, które mogą być odzyskane w procesie przerobu i ponownie zastosowane w reaktorach. Potencjał energetyczny materiałów paliwowych przy jednokrotnym użyciu paliwa w reaktorze termicznym wykorzystywany jest w bardzo małym stopniu. Przetworzenie wypalonego paliwa z recyklingiem pozwala wielokrotnie zwiększyć wykorzystanie potencjału energetycznego paliwa i zredukować objętości ostatecznych odpadów (ok. 5-krotnie) oraz ich radiotoksyczności (ok. 10-krotnie). Zużyte paliwo jądrowe transportuje się w specjalnych kontenerach, zapewniających osłonę przed promieniowaniem i odprowadzenie ciepła, spełniających rygorystyczne wymagania bezpieczeństwa.

6.2. Pozostałe technologie

Wszystkie technologie pozyskiwania energii ingerują w stan środowiska, a zasięg ich negatywnego wpływu zależy od skali stosowania konkretnej technologii. W przypadku nowych technologii trudno ten wpływ właściwie ocenić. Ocena wpływu konkretnych technologii na klimat wymaga rzetelnych badań i porównywania emisyjności w pełnym cyklu (od pozyskiwania surowca do finalnego zużycia energii) oraz przypisania całości emisji do miejsca jej zużycia. W praktyce mamy do czynienia z przypisywaniem emisji tylko miejscu wytwarzania energii elektrycznej. Zniekształca to informację o emisyjności pełnego cyklu technologicznego, z jednej strony przez ignorowanie emisji w miejscu pozyskania surowców, z drugiej – przez nieuwzględnianie strat związanych z przesyłem energii i surowców do jej produkcji. Z kolei eksport i import energii elektrycznej, pochodzącej ze źródeł o różnym poziomie emisyjności, zaciemnia obraz obciążeń emisjami *per capita*.

Na obecnie możliwy technologicznie miks energetyczny składają się tradycyjne technologie korzystające z energii pierwotnej paliw kopalnych oraz technologie korzystające z energii w czysto odnawialnej formie, takich jak wiatr, słońce, energia spadku wody. Energia pozyskiwana z biopaliw i biomasy w zakresie emisji zanieczyszczeń lokuje się między tą z surowców kopalnych a zeroemisyjną, ponieważ substancja organiczna dająca energię podczas spalania emituje CO₂, podobnie jak surowce kopalne. Teoretycznie jest to źródło bardziej przyjazne środowisku i klimatowi, gdyż zwraca do atmosfery

tyle CO₂, ile wcześniej pobrało i zaabsorbowało. Jednak po uwzględnieniu bilansu całego cyklu produkcji może się okazać, że emisja jest niższa, taka sama lub nawet wyższa niż w przypadku paliw kopalnych (tabela 1). Na drodze do zeroemisyjności produkcji energii elektrycznej istotna jest także długość okresu od wyemitowania CO₂ z biomasy do jego powtórnego wychwycenia przy produkcji biomasy przez rośliny. Okres ten to jeden rok w przypadku kukurydzy czy miskanta, kilka lat w przypadku wierzby, ale co najmniej kilkadziesiąt lat w przypadku drewna z lasu. Z kolei specjalne uprawy szybkooschnącej biomasy mogą ograniczać potencjał renaturalizacji wielu obszarów.

W stosowanych obecnie procesach produkcji energii w Polsce (energetyka oparta na węglu) powstają uciążliwe i szkodliwe dla mieszkańców efekty uboczne, w tym m.in. zanieczyszczenie gleby, wody i powietrza, zmiany w ekosystemach czy pogorszenie walorów krajobrazowych. Korzystanie z odnawialnych źródeł może ograniczyć to oddziaływanie, niemniej jednak nawet o ograniczonym oddziaływaniu należy pamiętać. I tak podstawowym identyfikowanym oddziaływaniem siłowni wiatrowych na środowisko jest hałas, ale dopiero w odległości mniejszej niż 400 m od typowej turbiny^{xvi}, podczas gdy obecnie w Polsce obowiązuje ustawowa regulacja nakazująca sytuowanie elektrowni wiatrowych w odległości od zabudowy mieszkaniowej równej lub większej dziesięciokrotności wysokości elektrowni mierzonej od poziomu gruntu do najwyższego punktu budowli^{xvii}. Inne oddziaływania to zmiany mikroklimatyczne po zawietrznej farm (destabilizacja nocnej warstwy granicznej i atmosfery, w efekcie wyższe temperatury i parowanie), oddziaływanie na krajobraz, które zależne jest od jego wartości przyrodniczej i historyczno-zabytkowej oraz specyfiki samych elektrowni. Negatywne oddziaływanie jest większe w krajobrazach o zróżnicowanej rzeźbie terenu i ze znacznym udziałem form przyrodniczych (jeziora, lasy, łąki) oraz historyczno-kulturowych (zabytki, historyczne miejsca), zwiększa się też z liczbą turbin, ich kontrastowym malowaniem, odległością od punktów i ciągów widokowych. Udowodniono, że ptaki szponiaste – jedna z najbardziej zagrożonych obecnie grup ptaków – przemieszczają się głównie poza zasięgiem rotorów, a kolizyjność i utrata siedlisk ptaków i nietoperzy jest często zagrożeniem przecenianym, gdyż w procesach lokalizacyjnych standardem jest inwentaryzacja ornitologiczna i chiropterologiczna oraz przeprowadzana w ramach oceny optymalizacja lokalizacji farm ograniczająca zagrożenia dla tych zwierząt^{xviii,xix,xx}.

W przypadku elektrowni fotowoltaicznych zwraca się uwagę głównie na to, że ich produkcja, ale i recykling nie będą obojętne dla środowiska. Tak więc należy dążyć do wydłużenia pracy ogniw, tak aby energia i surowce zużyte do ich wytworzenia, w przeliczeniu na wyprodukowaną energię elektryczną, były optymalnie wykorzystane^{xxi}. Hydroelektrownie również wpływają na środowisko, zarówno negatywnie, jak i pozytywnie. Ponieważ potencjał dla rozwoju dużych hydroelektrowni w Polsce jest niewielki, inwestycje bardzo kosztowne z długim okresem realizacji, pomijamy to zagadnienie.

Spiętrzenia w przypadku małych elektrowni wodnych utrudniają migrację ryb i bezkręgowców. Ich budowa jest sprzeczna z dominującą obecnie ideą rewitalizacji rzek.

Regulacje prawne dotyczące ochrony środowiska i klimatu są ważnym komponentem wpływającym na ceny energii dla odbiorców końcowych, bowiem wyższe standardy ochrony środowiska obowiązujące producentów i konsumentów energii na danym obszarze wiążą się z wyższymi cenami energii dla odbiorców końcowych. Dlatego też, ze względu na stopień ingerencji w środowisko i klimat, wartościowanie pierwotnych źródeł energii i związanych z nimi technologii powinno uwzględniać wpływ kosztów ochrony środowiska i klimatu na cenę energii dostarczanej odbiorcom końcowym, zarówno gospodarstwom domowym, jak i przemysłowi. Łagodzenie tych niepożądanych efektów należy do państwa, które powinno wypełniać tę funkcję poprzez ustalanie zasad korzystania z zasobów naturalnych, kompetentne wprowadzanie opłat za ich wykorzystywanie, a także poprzez bieżące określanie i korygowanie warunków, które muszą spełniać instalacje energetyczne.

7. Aspekty społeczne transformacji energetycznej

Poza nakładami finansowymi, skutecznymi rozwiązaniami technologicznymi oraz wolą polityczną, transformacji energetycznej musi towarzyszyć również znaczny wysiłek na poziomie społecznym, któremu będą równocześnie towarzyszyły nowe szanse na zrównoważony rozwój społeczno-ekonomiczny. Budowanie nowego miksu energetycznego, a także bardziej świadome korzystanie z energii, wymaga kompromisu i akceptacji zachodzących przemian przez konsumentów energii elektrycznej i pracowników branży energetycznej.

Najpoważniejsze wyzwania stoją jednak przed regionami węglowymi, które nie tylko będą zmuszone przebranżowić swoje gospodarki, ale i na nowo budować lokalne tożsamości. Jedną z najwyraźniejszych jest tożsamość śląska lub górnicza, która opiera się wprost na wykonywanym zawodzie wiążącym się z podtrzymywanym od dziesięcioleci wysokim statusem społecznym. Jest to wyzwanie na poziomie kulturowym, ale także realna trudność życiowa dla rodzin, które w wyniku odchodzenia od węgla utracą źródło utrzymania.

Odpowiedzią na stojące przed wieloma społecznościami (w tym społecznością górniczą) wyzwania jest zespół polityk społecznych określanych wspólnym mianem sprawiedliwej transformacji. Zakłada ona minimalizowanie kosztów społecznych transformacji energetycznej poprzez ochronę pracowników likwidowanych kopalń i elektrowni węglowych. Polityki społeczne w tym zakresie mają się skupiać na tworzeniu nowych miejsc pracy z wynagrodzeniami na odpowiednim poziomie, szkoleniach i opiece socjalnej. Komisja Europejska uruchomiła Mechanizm Sprawiedliwej Transformacji, który pozwoli na wdrażanie tych polityk przez kraje i regiony, które przedstawią przemyślane

plany działania w tym zakresie w 2021 roku (tzw. Krajowe Plany Transformacji i Regionalne Plany Sprawiedliwej Transformacji). Dla akceptacji planów transformacji bardzo ważne jest, żeby dokumenty te powstały w ścisłej współpracy z zainteresowanymi grupami społecznymi.

Poza pracownikami branży energetycznej na wysiłek wynikający z koniecznych zmian powinni przygotować się wszyscy konsumenci energii. Taryfy opłat za energię elektryczną muszą być urealnione, tak aby energia dostarczana wszystkim odbiorcom obciążona była godziwą marżą umożliwiającą transformację energetyczną. Najslabsze ekonomicznie grupy konsumentów, ale tylko one, powinny otrzymać odpowiednie osłony socjalne. W tym procesie znaczącą rolę odgrywa szerzenie rzetelnej i przystępnie podanej wiedzy na temat zmian klimatu i ich konsekwencji. Równie ważne są rozwiązania technologiczne i legislacyjne skłaniające do podejmowania energooszczędnych wyborów konsumenckich oraz stwarzające szansę na nowe oddolne inicjatywy energetyczne. Państwo powinno zachęcać i umożliwiać włączenie się w transformację energetyczną różnych podmiotów i grup społecznych budujących lokalną i regionalną niezależność energetyczną oraz zwiększających bezpieczeństwo energetyczne kraju. W ten sposób transformacja energetyczna stanie się szansą rozwojową lokalnych gospodarek.

Kwestie sprawiedliwej transformacji powinny być również uwzględniane na poziomie międzynarodowym. W szczególności lokalna neutralność klimatyczna nie może być realizowana przez eksport emisji do innych krajów, np. przez przenoszenie tam wysokoemisyjnych gałęzi przemysłu.

8. Kierunki transformacji na najbliższe lata

1. Transformacja energetyczna w Polsce powinna uwzględniać wszystkie nieemisyjne źródła energii. Docelowy miks powinien składać się jedynie z nieemisyjnych źródeł w proporcji zapewniającej bezpieczeństwo energetyczne w warunkach naturalnych, jakie w Polsce występują. Sposób dochodzenia do tego miksu powinien uwzględniać uwarunkowania techniczne, takie jak np. cykle inwestycyjne i potencjał dekarbonizacyjny stosowanych technologii, tak aby zapewnić pełną dekarbonizację energetyki najlepiej do roku 2040, ale nie później niż do roku 2050.
2. Należy w trybie pilnym odblokować rozwój energetyki wiatrowej na lądzie przez modyfikację przepisów prawnych i odpowiednią politykę aukcyjną. Energia pozyskiwana z wiatru na lądzie jest obecnie najtańsza (ryc. 2), przy czym niezbędny kapitał inwestycyjny jest na poziomie umożliwiającym inwestowanie mniejszym firmom. W krajach, w których energia z OZE odgrywa znacznie większą rolę niż obecnie w Polsce, właśnie to źródło odegrało decydującą rolę.
3. Dla szybkiego rozwoju OZE niezbędne jest harmonijne rozwijanie systemów maga-

zynowania energii i przystosowywanie sieci przesyłowej do rozproszonej produkcji energii, a także inwestowanie w szczytowe elektrownie gazowe typu OCGT. Jest szansa, by wykorzystać nasze opóźnienie w rozwoju OZE i uniknąć błędów prowadzących do problemów ze stabilnością sieci. PEP2040^{xxii} proponuje następujący model wyrównywania podaży energii z OZE: „dla bezpieczeństwa pracy KSE w przyszłości przyłączenie niestabilnego źródła energii będzie powiązane z obowiązkiem zapewnienia bilansowania w okresach, gdy OZE nie dostarcza energii elektrycznej do sieci”. Taki model, korzystny w przypadku dużych farm wiatrowych na morzu, jest w przypadku małych i średnich wytwórców niezwykle nieekonomiczny (niewykorzystanie efektu skali), będzie nie do końca skuteczny (nie jest obecnie możliwe zarządzanie tak rozproszonym magazynowaniem energii) i może stać się hamulcem rozwoju OZE (znaczny wzrost kosztów inwestycyjnych). Jako alternatywę, lub raczej uzupełnienie, proponujemy budowę sieci hubów złożonych ze szczytowych elektrowni gazowych – ważnych przy niedoborze energii i elektrolizerów – ważnych przy nadwyżkach energii, a zatem wykorzystujących okresowe niskie koszty energii elektrycznej³. Gaz ziemny byłby stopniowo wymieniany na wodór w takich jednostkach wytwórczych. Takie huby powinny być zarządzane centralnie dla zapewnienia stabilności sieci. Można też rozważyć przejściowe utrzymywanie części elektrowni węglowych wycofanych z ciągłej produkcji dla zapewnienia rezerwy, wykorzystywanej jedynie w przypadku głębokich i długotrwałych niedoborów energii z OZE.

4. Należy przyspieszyć budowę wiatrowych farm na Bałtyku. Jeśli obecnie trwają dopiero prace nad stworzeniem konsorcjum i organizuje się przetargi na koncesje, wdrożenie tego źródła energii w 2025 roku i osiągnięcie mocy 6 GW w 2030 roku (PEP2040) jest zagrożone.
5. Sukces fotowoltaiki prosumenckiej pokazuje, że ta forma powinna być dalej rozwijana. Należy stworzyć ramy prawno-organizacyjne, by mieszkańcy miast niedysponujący własnymi dachami mogli stać się prosumentami zbiorowymi, czego aktualne przepisy nie przewidują. Pozwoliłoby to na szersze wykorzystanie kapitału prywatnego w transformacji energetycznej. Rozwija się też prosumencka energetyka wiatrowa małej skali.
6. Inne formy produkcji energii (biogazownie, spalanie i piroliza biomasy), choć ważne lokalnie, pełnić będą ilościowo drugorzędną rolę. Należy uporządkować kwestię spalania biomasy w elektrowniach, by poprzez rygorystyczny zakaz spalania drewna z polskich lasów i importu oraz rozszerzenie pozyskiwania surowca z plantacji o szybkiej (rocznej lub kilkuletniej) rotacji ten sposób pozyskiwania energii elektrycznej nie był sprzeczny z celem uzyskania neutralności klimatycznej w sektorze energetycznym.

7. W polskich warunkach środowiskowych (brak możliwości istotnego rozwoju energetyki wodnej i geotermii, niskie usłonecznienie w chłodnej porze roku i długie okresy bezwietrzne na znacznej części kontynentu europejskiego) istotną rolę w domknięciu dekarbonizacji odegrać powinna energetyka jądrowa. Konieczne są więc systematyczne prace ponad podziałami politycznymi nad jej bezpiecznym rozwojem i budowa społecznego poparcia dla tego rozwiązania.
8. Ze względu na duże prawdopodobieństwo wzrostu cen uprawnień do emisji CO₂ należy ze szczególną starannością planować rozwój energetyki opartej na gazie ziemnym (źródło emisyjne) i budować gazowe bloki energetyczne zoptymalizowane pod kątem współpracy z energetyką opartą na zielonym wodorze i dobrze współpracujące z innymi źródłami odnawialnymi.
9. Kluczowe znaczenie będzie miała modernizacja sieci przesyłowych, w tym przystosowanie ich do zwiększającego się rozproszenia źródeł energii elektrycznej.
10. Czynnikiem warunkującym prawidłowy proces dekarbonizacji gospodarki jest cyfryzacja sektora energetycznego i stosowanie rozwiązań w chmurze. Cyfryzacja sektora energetycznego to z całą pewnością perspektywiczny kierunek transformacji.

9. Konieczność natychmiastowego przyspieszenia dekarbonizacji sektora energetycznego

Zapotrzebowanie na energię elektryczną będzie rosło, a energia z elektrowni jądrowych popłynie nie wcześniej niż za kilkanaście lat. W tej sytuacji racjonalna wydaje się dekarbonizacja wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o OZE, połączona z magazynowaniem energii i szczytową energetyką gazową w odniesieniu do obecnego zapotrzebowania.

Przyszła energia z elektrowni jądrowych powinna posłużyć do zaspokojenia nieuniknionego wzrostu zapotrzebowania, powodowanego rozwojem elektromobilności i dekarbonizacją przemysłu, mieszkalnictwa i rolnictwa. Energetyka jądrowa pozwoli też na zastąpienie rezerwy węglowej i w dalszej perspektywie gazowej.

Jeśli zaniechamy energicznych działań już teraz, zmarnujemy kolejną dekadę i doprowadzimy do zapaści gospodarczej. Pomijając rosnące koszty energii elektrycznej, musimy w sytuacji nieskutecznej dekarbonizacji liczyć się z poważnymi trudnościami na zagranicznych rynkach zbytu, jeśli eksportowane towary i usługi będą powiązane z wysoką emisyjnością. Na taką możliwość wskazuje gwałtowna zmiana nastrojów wokół emisji i kryzysu klimatycznego na świecie.

Jak wykazują obliczenia wielu ekspertów, dekarbonizacja naszej gospodarki będzie tańsza niż utrzymanie jej dotychczasowego modelu. To ważna przesłanka naszych przyszłych działań. Opóźnienia w procesie transformacji mogą być więc bardzo kosztowne^{xxiii}.

Przypisy

- ¹ CO₂eq to uniwersalna jednostka służąca do pomiaru emisji gazów cieplarnianych, która odzwierciedla ich różny współczynnik ocieplenia globalnego. Określa stężenie dwutlenku węgla, którego emisja do atmosfery miałaby identyczny skutek, jak dane stężenie porównywalnego gazu cieplarnianego.
- ² W elektrowniach typu CCGT rozgrzane gazy spalinowe poruszają turbiny gazowe, a po wykonaniu pracy są jeszcze na tyle gorące, że mogą produkować parę dla klasycznych turbin parowych. Dlatego są to bardzo wydajne elektrownie (nawet ponad 60%). Elektrownie gazowe typu OCGT pracują tylko w jednej fazie – nie mają generatorów parowych. Są mniej wydajne niż CCGT (wydajność około 40%, nieco mniej niż w przypadku najnowocześniejszych elektrowni węglowych). W przypadku tylko okresowego użytkowania, przy braku słońca i wiatru, wydajność jest mniej istotna niż czas uruchamiania (ok. 10 minut) i koszt budowy (około 30% niższy niż w przypadku CCGT).
- ³ Takie projekty już istnieją. W wygaszanej elektrowni węglowej Moorburg w Hamburgu zielony wodór ma być produkowany już w 2025 roku <https://www.wnp.pl/energetyka/wodor-moze-dac-drugie-zycie-elektrowni-weglowej,445600.html>. Pilotażowy projekt powiązania energetyki wiatrowej na morzu z produkcją wodoru o mocy 2 MW planuje duńska firma Ørsted – pierwsza tona wodoru ma być wyprodukowana już w 2021 roku <https://biznesalert.pl/dunski-orsted-bedzie-produkowal-zielony-wodor-z-morskich-farm-wiatrowych/>. Co istotne, firma Ørsted wyraziła zainteresowanie współpracą z polskimi elektrowniami wiatrowymi na morzu.

Źródła

- i <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/fossil-co2-emissions-all-world-countries-2020-report>
- ii Friedlingstein P. et al., Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>, 2020
- iii <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- iv <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- v <https://eur-lex.europa.eu/content/paris-agreement/paris-agreement.html?locale=pl>
- vi <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/change-of-co2-eq-emissions-2#tab-dashboard-01>
- vii <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- viii Monthly Electricity Statistics. Revised Historical Data, with data up to March 2020, <https://www.iea.org/reports/monthly-electricity-statistics>
- ix <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- x Czyżak P., Wrona, A., 2021, *Droga do celu. Odejście od węgla w polskiej elektroenergetyce*, Infracore Policy Paper 01/2021
- xi Uchwała nr 141 Rady Ministrów w sprawie aktualizacji programu wieloletniego pod nazwą „Program polskiej energetyki jądrowej”, *Monitor Polski* z 16 października 2020 r., poz. 946
- xii Gates B., 2021, *Jak ocalić świat od katastrofy klimatycznej*, Wydawnictwo Agora.
- xiii <https://wysokienapiecie.pl/33397-bilansowanie-magazynowanie-pradu-w-polsce-co-zmienilo-sie-od-czasow-prl/>

- xiv Nowak W., 2019, Magazynowanie energii. PAUza 487, 7 listopada 2019, http://pauza.krakow.pl/487_2&3_2019.pdf
- xv Energy Storage Technology and Cost Characterization Report, HydroWires, U.S. Department of Energy, czerwiec 2019, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage%20Cost%20and%20Performance%20Characterization%20Report_Final.pdf
- xvi Boczar T., Malec T., 2016 *Ocena oddziaływania hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe – charakterystyka zjawiska* [w:] *Dobry wiatr dla regionów. Eksperti o energetyce wiatrowej*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Warszawa, s. 109–144, <https://kfb-acoustics.com/wp-content/uploads/2020/10/dobry-wiatr-dla-regionow-eksperti-o-energetyce-wiatrowe-1.pdf>
- xvii Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, tekst jednolity Dz.U. 2020, poz. 981
- xviii PSEW, 2008. Wytyczne w zakresie oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na ptaki, Szczecin, s. 1-24, https://otop.org.pl/uploads/media/wiatraki_otop_psew.pdf.
- xix Kepel A., Ciechanowski M., Jaros R., 2013 Wytyczne dotyczące oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na nietoperze (projekt)., GDOŚ, Warszawa, s. 1–74, http://www.ansee.pl/wp-content/uploads/2015/09/Wytyczne_dotyczace_oceny_oddziaływania_elektrowni_wiatrowych_na_nietoperze.pdf
- xx Rydell J., Engstrom H., Hedenstrom A., Larsen J.K., Pettersson J., Green M., 2012, The effect of wind power on birds and bats. Vindval. Swedish Environmental Protection Agency, <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6791-5.pdf?pid=21758>
- xxi Bakoń T., 2015, Wpływ produkcji i recyklingu elektrowni fotowoltaicznych na środowisko. Elektro.info 1-2/2015, ISSN 16428722, wyd. Medium, <https://www.elektro.info.pl/artukul/fotowoltaika/59052,wpływ-produkcji-i-recyklingu-elektrowni-fotowoltaicznych-na-srodowisko>
- xxii Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r., Monitor Polski 2021, poz. 264
- xxiii Materiały konferencji EEC Trends, Katowice, luty 2021

Skład Interdyscyplinarnego Zespołu Doradczego ds. Kryzysu Klimatycznego przy Prezesie PAN, który opracował Komunikat nr 03/2021 na temat perspektyw dekarbonizacji wytwarzania energii elektrycznej w Polsce:

Przewodniczący

prof. dr hab. Szymon Malinowski, Uniwersytet Warszawski, Instytut Geofizyki UW

Zastępca przewodniczącego

prof. dr hab. Jacek Piskozub, Instytut Oceanologii PAN

Sekretarz

dr hab. Iwona Wagner, Europejskie Regionalne Centrum Ekohydrologii PAN;
Uniwersytet Łódzki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska,
Katedra UNESCO Ekohydrologii i Ekologii Stosowanej

Członkowie

prof. dr hab. Krzysztof Kwiatek, Państwowy Instytut Weterynaryjny
dr hab. Adam Habuda, Instytut Nauk Prawnych PAN

dr Krzysztof Niedziałkowski, Instytut Filozofii i Socjologii PAN
dr Agata Goździk, Instytut Geofizyki PAN
prof. dr hab. inż. Tomasz Okruszko, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego,
przewodniczący Komitetu Gospodarki Wodnej PAN
prof. dr hab. Zbigniew Kundzewicz, Instytut Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN
dr hab. inż. Andrzej Jagodziński, Instytut Dendrologii PAN
dr hab. inż. Anna Januchta-Szostak, Politechnika Poznańska, Wydział Architektury,
Instytut Architektury i Planowania Przestrzennego
prof. dr hab. Jan Kozłowski, Uniwersytet Jagielloński, Wydział Biologii,
Instytut Nauk o Środowisku
prof. dr hab. Jan Kiciński, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN
dr Aleksandra Kardaś, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki
dr Justyna Orłowska, Krajowy Ośrodek Zmian Klimatu (IOŚ-PIB)
dr hab. Mateusz Strzelecki, członek Akademii Młodych Uczonych PAN
Ze strony PAN Zespołem opiekuje się prof. Paweł Rowiński, wiceprezes PAN.

W pracach nad Komunikatem nr 03/2021 pracowali także zaproszeni eksperci:

prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych,
Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Janusz Lewandowski, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Czesława Rosik-Dulewska, Instytut Inżynierii Środowiska i Biotechnologii
Uniwersytet Opolski, zastępca przewodniczącego Rady Kuratorów Wydziału IV Nauk
Technicznych PAN
prof. dr hab. Ludwik Pieńkowski, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Energetyki Jądrowej,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**Prospects for decarbonisation
of electricity generation in Poland
Statement 03/2021 of the Interdisciplinary Advisory Group
on Climate Crisis to the President of the PAS**

Key words: decarbonisation, electricity generation, Poland, science advice