

JAN KOZŁOWSKI *

Trudna droga do dekarbonizacji gospodarki

Wstęp

Wczesna reakcja na informacje o zmianie klimatu bardzo różniła się od obecnej. Gdzieś na początku lat 80. ubiegłego wieku, gdy pojawiły się ostrzeżenia naukowców, dominującą reakcją było zaprzeczanie, a jeśli nawet zmiana klimatu była akceptowana, przypisywano ją naturalnym cyklom, a nie działalności człowieka. W społeczeństwach dominowała obojętność lub lekceważenie problemu ze strony polityków. Nie podejmowano żadnych działań zapobiegawczych. Dziś sytuacja jest zupełnie inna. Istnieje niewielka, ale głośna, liczba ludzi twierdzących, że zmian klimatu nie ma, lub częściej, że ich przyczyną nie są działania ludzkie. Takie postawy są podtrzymywane przez celowe działania dezinformacyjne części lobby paliw kopalnych, a przede wszystkim reżim Putina. Znacznie już mniejsza część społeczeństw jest obojętna, a dominuje wszechobecne ostrzeżenie i nawoływanie do podejmowania działań zapobiegawczych. Trudno dziś w bardzo wielu krajach wygrać wybory bez haseł związanych z zagrożeniem katastrofą klimatyczną, a odpowiednia polityka klimatyczna jest jednym z istotnych kryteriów wyboru, zwłaszcza dla młodego pokolenia.

Często słyszy się, że nic się w tej kwestii nie robi. Jest to oskarżenie fałszywe. Robi się bardzo wiele, chociaż ciągle zdecydowanie za mało, by zapobiec katastrofie. Niestety taka prawidłowa reakcja przyszła za późno i nie ma pewności, czy korzystne procesy da się dostatecznie upowszechnić i przyspieszyć, by uniknąć katastrofalnych zjawisk.

Emisje

Aktualne emisje dwutlenku węgla (CO₂), głównie z paliw kopalnych, sięgają monstrualnej wartości 37 miliardów ton (Gt) rocznie. Trudno sobie wyobrazić taką ilość, przeprowadźmy zatem następujący eksperyment myślowy: gdyby z tych rocznych emisji wyjąć czysty węgiel i załadować go na węglarki, to utworzony z nich pociąg opasałby równik 45 razy! Oczywiście nie cały ten dwutlenek węgla ostatecznie pozostaje w atmosferze: część jest wchłaniana przez oceany, co jest zresztą obciążone ogromnym ryzykiem, między innymi wzrostem zakwaszenia, będącym jedną z przyczyn zamierania raf koralowych; część jest wchłaniana przez ekosystemy lądowe. Jednak w atmosferze

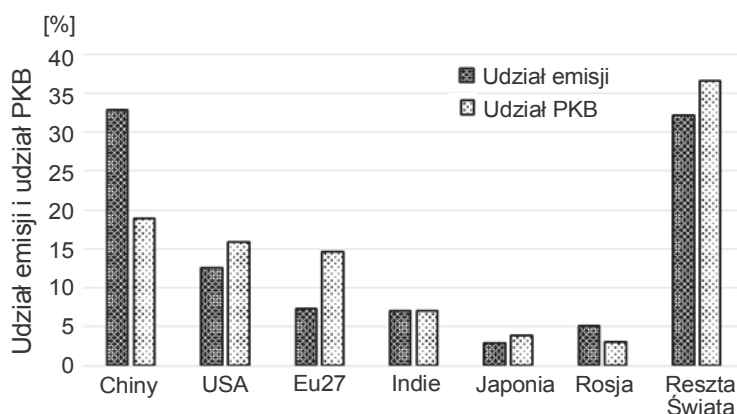
* Prof. dr hab. Jan Kozłowski (jan.kozlowski@uj.edu.pl), członek rzeczywisty PAN, Instytut Nauk o Środowisku Uniwersytetu Jagiellońskiego (emeryt)

przybywa rocznie kilka gigaton ciepłarnianego dwutlenku węgla. Stężenie tego związku przekroczyło już 419 ppm, a więc zwiększyło się o 50% w stosunku do okresu przedindustrialnegoⁱ. Sytuacja jest jeszcze bardziej katastrofalna, jeśli uwzględnimy emisje innych gazów ciepłarnianych. Wprawdzie są one objętościowo znacznie mniejsze lub wręcz niewielkie, ale efekt cieplarniany każdej masy jest wielokrotnie większy niż dwutlenku węgla – około 25 razy w przypadku metanu (CH_4) i 300 razy w przypadku tlenku diazotu (N_2O)ⁱⁱ, uwzględniając okres półtrwania tych gazów w atmosferze. Podawany w literaturze efekt cieplarniany metanu w stosunku do dwutlenku węgla rzędu 80 oparty jest zapewne wyłącznie na sile pochłaniania ciepła i nie bierze pod uwagę krótkiego trwania tego związku w atmosferze. Według Europejskiej Agencji Środowiska w roku 2019 dwutlenek węgla stanowił 80% emisji gazów ciepłarnianych, metan 11% – po uwzględnieniu siły efektu, tlenek diazotu 6%, natomiast wodorofluorowodory 2%, oczywiście też po przemnożeniu przez siłę efektu cieplarnianegoⁱⁱⁱ. Oszacowania US Environmental Protection Agency są bardzo podobne^{iv}. Wymienione gazy, z wyjątkiem CO_2 , rozkładają się w atmosferze do dwutlenku węgla, o ile mają w swoim składzie węgiel, lub do azotu cząsteczkowego w przypadku N_2O . Okres półtrwania metanu wynosi około 9 (8–12) lat (Wuebbles i Hayhoe 2002, Muller i Muller 2017), a N_2O nieco ponad 100 lat (Prather i inni 2015), a zatem ustaliłby się stan równowagi, gdyby antropogeniczne i naturalne emisje były na stałym poziomie. Jednak one ciągle rosną i w rezultacie stężenie metanu jest dziś o około 150% wyższe niż w okresie przedindustrialnym (Muller i Muller 2017).

Gdzie szukać winnych? Obecnie największy udział w emisjach z paliw kopalnych mają Chiny, odpowiedzialne za około 1/3 emisji, na drugim miejscu są Stany Zjednoczone, na trzecim Unia Europejska (ryc. 1). Za duże emisje odpowiedzialne są jeszcze Indie, Rosja i Japonia. Warto porównać PKB tych krajów z emisjami. Porównanie takie pozwala ocenić, jak emisyjna jest gospodarka. Stany Zjednoczone, a zwłaszcza Unia Europejska, mają stosunkowo niskie emisje w stosunku do PKB. Chiny mają wysokie emisje w stosunku do PKB, ale pamiętajmy, że kraje rozwinięte „wyeksportowały” tam dużą część produkcji przemysłowej. Warto jeszcze zwrócić uwagę na ogromną dysproporcję między PKB i emisjami w przypadku Rosji, a także na małe PKB tego kraju, co jest istotne w świetle toczącej się wojny z Ukrainą.

W latach 1990–2021 emisje malały rocznie o 0,2% w USA, 1,0% w UE27, 0,7% w Rosji i 2% w Japonii, natomiast rosły średnio o 5,4% w Chinach i o 4,9% w Indiach. Duży roczny wzrost odnotowała w tym okresie jeszcze Indonezja (4,9%), Iran (4,1%), Arabia Saudyjska (4,0%), Turcja (3,6%), Korea Południowa (2,7%) i Brazylia (2,5%). Globalnie w latach 1990–2021 emisje wzrastały o 1,7% rocznie^v. W Chinach i Iranie emisje wzrosły nieznacznie nawet w okresie pandemii COVID 19 (lata 2019–2020), a w Indiach, Rosji, Arabii Saudyjskiej, Brazylii i Turcji postpandemiczny wzrost emisji

przekroczył spadek w okresie pandemii (lata 2019–2021). Pozytywnym zjawiskiem był spadek emisji o około 5% w stosunku do okresu sprzed pandemii w USA, UE i Japonii, nieco mniejszy (3,6%) w przypadku Korei Południowej, a znacznie większy w przypadku Meksyku (13,1%), Australii (9,6%), Brazylii, Kanady, Afryki Południowej i Indonezji (po około 7%). Łącznie kraje, w których nie nastąpiła pełna kompensacja poziomu emisji w okresie postpandemicznym, są odpowiedzialne obecnie za blisko 31% globalnych emisji, a kraje, w których nastąpiła nadkompensacja, aż 51% globalnych emisji. Pozostałe kraje, o łącznej emisji 18%, ale indywidualnym udziale poniżej 1%, nie zostały uwzględnione. Globalnie emisje spadły jedynie o 0,4% w okresie 2019–2021^v.

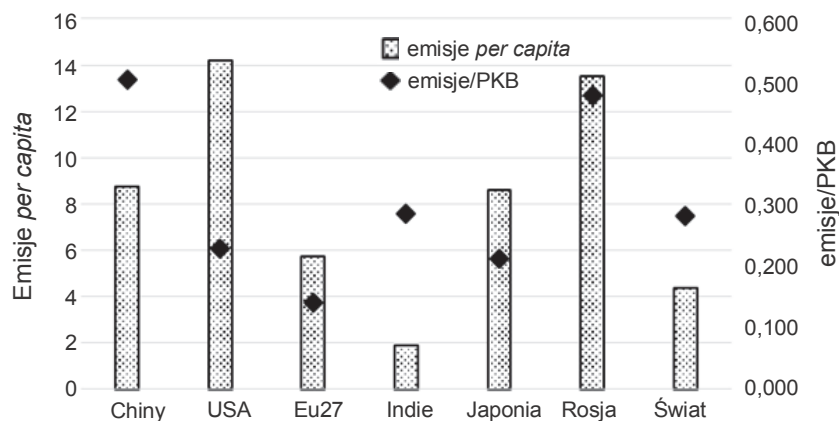


Ryc. 1. Procentowy udział emisji z paliw kopalnych i udział PKB (według parytetu siły nabywczej) w PKB świata. Wg CO₂ emissions of all world countries. JRC/IEA/PBL 2022 Report^v. Źródło to podaje dane na temat PKB wg Banku Światowego, inne źródła podają nieco inne dane

Zupełnie inaczej sprawa wygląda, jeśli spojrzymy na emisje *per capita* (ryc. 2). Z wszystkich porównywanych krajów najwyższe tak mierzone emisje mają Stany Zjednoczone (3,3 razy wyższe niż średnia dla świata), choć jest kilka krajów o większych emisjach *per capita*, ale znacznie mniejszych ekonomiach (np. Kanada, Australia, niektóre kraje arabskie). Pod względem emisji *per capita* Chiny są na poziomie Japonii (dwa razy większe niż średnia światowa), a Indie poniżej połowy średniej dla świata. Zaskakująco wysokie są emisje *per capita* w Rosji, niewiele mniejsze niż w USA – 3,1 razy średnia dla świata – co świadczy o ogromnej energochłonności tamtejszej gospodarki, a pośrednio o zaoferowaniu. Unia Europejska ma emisje *per capita* niskie jak na kraje wysoko rozwinięte – przekraczające tylko o 30% średnią dla świata. Interesujący jest wskaźnik intensywności energetycznej gospodarki, emisje/PKB (ryc. 2). Wskaźnik ten jest najwyższy w Chinach (500 kg CO₂ na 1000 dolarów) i tylko nieco niższy w Rosji. Każde 1000 dolarów PKB jest obciążone emisją nieco ponad 200 kg CO₂ w Stanach Zjednoczonych i Japonii, a jedynie 140 kg w Unii Europejskiej. Musimy jednak pamiętać, że

kraje rozwinięte przeniosły dużą część energochłonnej produkcji do Chin, które stały się „fabryką świata”.

Odpowiedzialność za obecną sytuację klimatyczną można zmierzyć przez skumulowane emisje. Różne źródła podają nieco różne liczby, ale ogólny obraz jest zawsze ten sam. Największą odpowiedzialność ponoszą Stany Zjednoczone, których emisje od rozpoczęcia rewolucji przemysłowej do 2017 roku stanowiły 25% wartości globalnej, na drugim miejscu UE28 (22%), dalej Chiny (12%), Rosja (6%), Japonia (4%) i Indie (3%)^{vi}. Jeśli uwzględni się emisje nie tylko ze spalania paliw kopalnych, ale także ze zmian użytkowania gruntu (LULUCC), przede wszystkim wylesiania, udział Stanów Zjednoczonych zmniejsza się do 20%, gdyż Brazylia i Indonezja o niewielkim udziale w skumulowanych emisjach z paliw kopalnych miały duży udział w emisjach z LULUCC^{vii}. Trzy duże i najbogatsze organizmy gospodarcze (USA, UE28, czyli UE27 i Wielka Brytania, oraz Japonia) ponoszą największą odpowiedzialność i dlatego mają moralny obowiązek poniesienia największych kosztów dekarbonizacji. Wysuwane na COP27 żądania zwiększenia pomocy tych krajów w dekarbonizacji krajów rozwijających się wydają się jak najbardziej uzasadnione. Wiele z tych krajów miało minimalny udział w skumulowanych emisjach, a ponoszą największe koszty związane z katastroficznymi zjawiskami wynikającymi ze zmian klimatu. Dotychczasowe zobowiązania, 100 mld dolarów rocznie, nie były w pełni pokrywane, a są one wysoce niewystarczające.



Ryc. 2. Emisje *per capita* (t CO₂/rok) słupki i emisje w stosunku do wielkości PKB (t CO₂/k USD) romby^v

Czy możliwe jest powstrzymanie ocieplenia klimatu bez dekarbonizacji?

Istnieją pomysły, by walczyć z ociepleniem klimatu metodami geotechnicznymi, takimi jak umieszczenie w górnych warstwach atmosfery folii odbijających światło czy rozpylenie ogromnych ilości dwutlenku siarki, który działa odwrotnie niż CO₂. Mówi się też o wzbogacaniu oceanów w związku żelaza, co zwiększyłoby radykalnie absorpcję CO₂

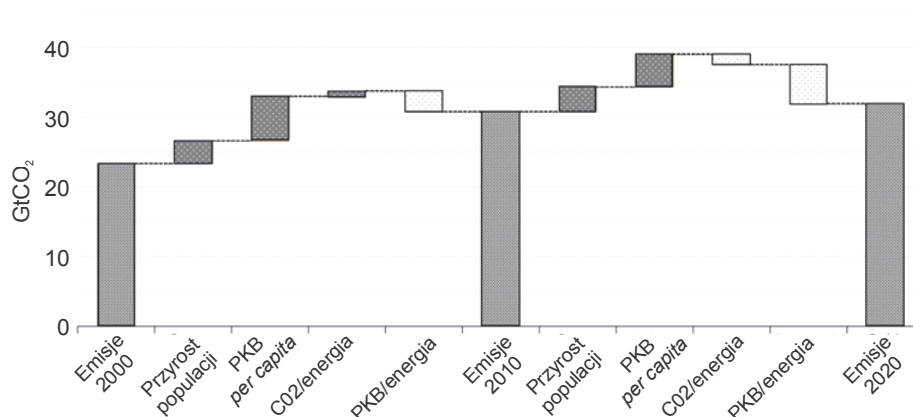
i produktywność oceanów. Powinniśmy temu bardzo stanowczo przeciwstawiać się ze względu na nieprzewidywalne skutki. Jak wyliczyć bez ryzyka błędu ilość folii i jak usunąć ją w razie potrzeby? Dwutlenek siarki musiałby być ciągle dodawany i spadałby na Ziemię w postaci kwaśnych deszczów. Zwiększona produktywność oceanów i tak stanowi ogromne zagrożenie – rośnie powierzchnia niebezpiecznych stref beztlenowych. Zatem pozostaje jedynie dekarbonizacja gospodarki i omówiona dalej bezpieczna dekarbonizacja atmosfery.

Czy dekarbonizacja gospodarki jest ekonomicznie wykonalna?

Według Międzynarodowej Agencji Energii (International Energy Agency, IEA) koszt dekarbonizacji gospodarki do 2050 roku będzie rzędu 100 bilionów dolarów, co jest wartością zbliżoną do PKB świata. Po rozłożeniu na lata jest to 3,57 % PKB świata. Jest to wartość duża, ale nie poza zasięgiem. Problemem nie są jednak pieniądze, ale konieczność gruntownej przebudowy finansów świata. Niezbędne jest też wiarygodne i uczciwe monitorowanie sytuacji, a ciągle brak dostatecznej wiedzy, jak to robić. Muszą być wprowadzone takie mechanizmy, by jedne kraje nie „pasożytowały emisyjnie” na innych. Kraje o niskim PKB *per capita* będą musiały otrzymać ogromne wsparcie, a dotychczasowe zobowiązania są wykonywane tylko w niewielkiej części.

Unia Europejska jest liderem dekarbonizacji, ale na szczęście Stany Zjednoczone pod przywództwem Joe Bidena rozpoczęły zdrowy wyścig, co znalazło swój wyraz w dokumencie US Inflation Reduction Act. Wykonanie tych zadań może być nieco utrudnione z powodu przejścia kontroli nad Izbą Reprezentantów przez republikanów, sprzyjających producentom paliw kopalnych. Nie wydaje się jednak, by republikanie byli w stanie zahamować proces dekarbonizacji gospodarki w Stanach Zjednoczonych, gdyż nie odzyskali oni kontroli nad Senatem. Chiny robią bardzo wiele dla obniżenia emisji. Wprawdzie obiecują zeroemisyjność dopiero w 2060 r., 10 lat później niż Unia Europejska i Stany Zjednoczone, ale pamiętajmy, że Chiny są fabryką świata, także w produkcji urządzeń służących obniżaniu emisji, takich jak panele fotowoltaiczne czy pewne elementy turbin wiatrowych. Niestety szczyt emisji zapowiadają Chiny dopiero około roku 2030, a obecnie ciągle intensywnie budują elektrownie węglowe. Te trzy organizmy gospodarcze są odpowiedzialne za około połowę emisji na świecie, więc są podstawy do ostrożnego optymizmu.

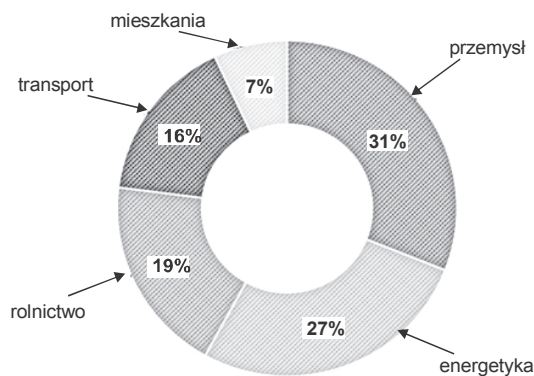
Emisję CO₂ trudno jest ograniczyć, gdyż ciągle rośnie liczba ludności na świecie, choć tempo wzrostu maleje (ryc. 3). Ponadto rośnie PKB świata, co wciąż jeszcze wiąże się ze wzrostem emisji. W okresie 2000–2010 emisja znacznie wzrosła, mimo pewnego zmniejszenia energochłonności gospodarki. W okresie 2010–2020 dzięki niewielkiemu zmniejszeniu emisji na jednostkę energii i znacznemu zmniejszeniu energochłonności gospodarki emisje wzrosły już niewiele, ale wzrosły, a powinny już maleć (ryc. 3).



Ryc. 3. Emisje ze spalania paliw kopalnych w latach 2000, 2010 i 2020 oraz przyczyny zmian. Według IEA (2022), Energy Efficiency, IEA, Paris^{viii}

Emisje w podziale na sektory gospodarki

Aby rozważyć drogę do dekarbonizacji gospodarki konieczne jest rozbitcie emisji na poszczególne sektory. Można znaleźć w literaturze i Internecie nieco różne dane ze względu na trudności metodyczne takich ocen.



Ryc. 4. Globalne emisje CO₂ w rozbitciu na sektory. Według Gates (2021)

Rycina 4 przedstawia taki podział w skali globalnej według Billa Gatesa, który posiada zespół doskonałych doradców (Gates 2021). Lamb i inni (2021), na podstawie szerokiego przeglądu literatury, podają następujący podział w roku 2018: energetyka – 34%, przemysł – 24%, transport – 21%, budynki – 8%, rolnictwo, leśnictwo i zmiana użytkowania gruntów – 21%. W Stanach Zjednoczonych proporcje są nieco inne: transport przyczynia się do 33% emisji, energetyka – 31%, przemysł – 16%, mieszkania i usługi

– 12%, a rolnictwo – 8%^{iv}. W Unii Europejskiej najczęściej produkcja energii elektrycznej podawana jest łącznie z produkcją ciepła, gdyż ze względu na powszechność kogeneracji trudno te sektory rozdzielić. Ten sektor był odpowiedzialny w 2018 roku za zaledwie 27% emisji CO₂, co wynika z konsekwentnie prowadzonej transformacji energetycznej wspieranej przez system handlu uprawnieniami do emisji. Udział transportu w emisji w UE wynosił 26%, w budynkach 11%, a w przemyśle aż 31%^{ix}. Dane te nie są do końca porównywalne z poprzednimi, gdyż nie uwzględniają emisji z rolnictwa i zmiany użytkowania gruntów. W Polsce udział emisji z elektrowni i elektrociepłowni wynosił w 2021 roku aż 37%, gdyż system energetyczny jest u nas oparty głównie na węglu brunatnym i kamiennym (łącznie 72%), przy niskim udziale źródeł odnawialnych – około 17%^x.

Dekarbonizacja energetyki

Niewątpliwie produkcja energii elektrycznej odgrywa prominentną, jeśli nie dominującą rolę w globalnej emisji CO₂. Ponadto dekarbonizacja pozostałych sektorów bardzo zwiększy zapotrzebowanie na energię elektryczną nawet przy oszczędniejszym gospodarowaniu. Technologie prowadzące do bezemisyjnej energetyki są dojrzałe. Są one oparte na źródłach odnawialnych (OZE) i energetyce jądrowej. W przypadku OZE jest to przede wszystkim prosumencka fotowoltaika rozproszona (głównie panele fotowoltaiczne na dachach), farmy fotowoltaiczne, wiatraki na lądzie i wiatraki na morzu. Niestety energia elektryczna z biogazu odgrywa w Polsce znacznie mniejszą rolę niż powinna. Energia z biogazu jest dość droga, ale biogazownie pełnią dodatkową rolę środowiskową utylizacji odpadów rolniczych, przede wszystkim z hodowli zwierząt, a także odpadów z przemysłu spożywczego. Odpowiednie finansowanie tej dodatkowej roli zapewniłoby energii elektrycznej z biogazu konkurencyjność. Ponadto biogazownie mogłyby pełnić rolę magazynów energii – stosunkowo niewielkim kosztem można by powiększyć magazyny biogazu i moc agregatów prądotwórczych, a następnie uruchamiać generowanie energii elektrycznej w okresach największego zapotrzebowania przy niedoborze energii ze słońca i wiatru, co oznacza też sprzedaż energii po wysokiej cenie, a zatem większą rentowność biogazowni.

Znaczne ilości energii elektrycznej, chociaż obecnie zdecydowanie mniejsze niż z wiatru i słońca, pochodzą ze spalania biomasy. Kwestia najlepszego wykorzystania drewnianej biomasy w celach energetycznych będzie omówiona w rozdziale dotyczącym wycofywania dwutlenku węgla z atmosfery. Z punktu widzenia obowiązujących przepisów unijnych za energię odnawialną uważa się także tę uzyskaną ze spalania odpadów. Jest to zabieg księgowy, gdyż nie jest to w rzeczywistości energia odnawialna, jednak ten przepis ma przyspieszyć rozwój spalania odpadów nienadających się do recyklingu, co jest o tyle uzasadnione, że spalanie odpadów bez odzysku energii, czy też rozkład odpadów, przyczyniałyby się jeszcze bardziej do zwiększenia efektu cieplarnianego. W Pol-

sce od kilku lat wydzielana jest frakcja bioodpadów. Najlepszym sposobem ich wykorzystania byłaby fermentacja w biogazowniach, które wymagałyby nieco innej technologii niż biogazownie rolnicze ze względu na niejednorodność wsadu i domieszkę worków plastikowych, w których odpady te powszechnie, choć wbrew zaleceniom, są wyrzucane.

Istnieje także szereg innych odnawialnych źródeł energii, na przykład wykorzystanie prądów morskich, falowania, różnic zasolenia czy temperatury, jednak są to ciągle technologie niedojrzałe i raczej nie odegrają istotnej roli w trwającej obecnie rewolucji energetycznej w skali globalnej.

Wadą większości odnawialnych źródeł energii, poza biogazem, jest to, że są one niedyspozycyjne – nie można dowolnie sterować ich produkcją. Jeśli brak wiatru i słońca, żadne przepisy i nakazy nie zmuszą tych urządzeń do produkcji energii elektrycznej. Dlatego zwiększanie udziału OZE natrafia na pewne bariery, których przezwyciężenie generuje dodatkowe koszty. Chwilowe wahania produkcji, w skali minut, mogą kompensować superkondensatory. Ich zaletami jest możliwość błyskawicznego włączenia, w skali sekund czy nawet ułamków sekund, a także ogromna liczba ładowań i rozładowań bez utraty żywotności. Wadą jest niewielka ilość energii, jaką mogą zmagazynować. Nie będą one pełnić innej roli niż starterów do chwili włączenia innych źródeł. Rozwiązaniem umożliwiającym wspomaganie sieci elektroenergetycznej w skali godzin są elektrownie szczytowo-pompowe i baterie. Obecnie jako najbardziej dojrzała technologia dominują baterie litowo-jonowe. Budowane są w świecie potężne stacje takich baterii. Potrafią one uruchamiać dużą moc i utrzymywać ją przez szereg godzin. Latem 2022 r., podczas fali upałów w Kalifornii i związanego z nią szczytu zapotrzebowania niezbędnego do klimatyzacji pomieszczeń, stacje bateryjne o mocy przekraczającej 3 GW^{xi} ratowały stabilność sieci, niekiedy dostarczając więcej mocy niż ostatnia działająca w Kalifornii elektrownia jądrowa. W krytycznym momencie 5 września 2022 r. baterie pracowały z pełną mocą 3,36 GW, a elektrownia jądrowa zaledwie 2,25 GW, a w ciągu trzech krytycznych godzin baterie pracowały z mocą 2 GW, ratując sieć przed blackouted^{xii}. Co ciekawe, podczas fali krytycznych upałów dwa lata wcześniej baterie w Kalifornii potrafiły dostarczyć zaledwie 125 MW energii przez dwie godziny, co nie zapobiegło blackoutowi^{xiii}. Tak niewiarygodnie szybki wzrost zdolności magazynowania energii elektrycznej jak w Kalifornii jest unikalny, ale baterie są stosowane coraz częściej w wielu krajach. Niestety w Polsce ta technologia dopiero raczkuje – łączna moc zainstalowana w stacjonarnych bateryjnych magazynach energii wynosi obecnie około 35 MW – nieco ponad jeden procent mocy sieciowych magazynów energii w Kalifornii^{xiii}. Szacowana liczba 7 tys. przydomowych magazynów to dodatkowa moc 27,5 MW i pojemność ok. 55 MWh. Są plany dalszego rozwoju magazynów energii w Polsce, oby były realizowane jak najszybciej, bo już dziś w pewnych regionach w okresie szczytowej

produkcji niecała nadwyżka energii prosumenckiej może być przyjęta przez sieć, co prowadzi nawet do kompletnego wyłączenia fotowoltaiki na niektórych dachach.

Dominująca rola baterii litowo-jonowych w magazynowaniu energii może być przejściowa. W przyszłości bardziej obiecująca może być technologia baterii przepływowych. Składają się one z następujących elementów: jednostki centralnej, od wielkości której zależy dostępna moc ładowania i rozładowywania, oraz dwóch zbiorników elektrolitu – naładowanego i rozładowanego, od wielkości których zależy pojemność. Obie składowe są skalowalne (Chen i inni 2017). Baterie przepływowe nie są jeszcze technicznie dopracowane i dlatego nie są jeszcze stosowane na szerszą skalę.

Moc wodnych elektrowni szczytowo-pompowych w Polsce wynosi blisko 1,8 GW. Odgrywają one już dziś ogromną rolę w stabilizacji sieci, czego najlepszym przykładem było zachowanie dostaw energii po awarii niemal całej Elektrowni Bełchatów w maju 2021 r. Istnieje możliwość nowych inwestycji, zwiększających moc takich elektrowni nawet do 5 GW^{xiv}, ale ze względu na wysoki koszt inwestycyjny, koszty środowiskowe i długotrwałą realizację, inwestowanie w magazyny baterijne może okazać się bardziej opłacalne i skuteczne. Trzeba jednak nadmienić, że elektrownie szczytowo-pompowe zyskują w świecie popularność ze względu na rozwój OZE. Jest to dzisiaj najtańszy sposób magazynowania energii.

W miarę rozwoju energetyki wykorzystującej wiatr i słońce pojawia się nowe zagrożenie – zdarza się, że sieć nie jest zdolna do przyjęcia nadwyżek energii produkowanej w szczycie. Magazyny energii są częściowym rozwiązaniem tego problemu. W przyszłości powinny być też instalowane stacje elektrolitycznej produkcji „zielonego” wodoru z wody, uruchamiane w przypadku przeciążenia sieci nadmiarem po stronie podaży. Takie rozwiązanie będzie najpewniej przyszłościowym stabilizatorem sieci, gdy rozwój OZE zajdzie tak daleko, że nadwyżki energii będą zjawiskiem częstym lub nawet regularnym.

W niektórych rejonach świata magazyny energii i elektrolizatory wystarczą dla stabilizacji sieci intensywnie obciążonej energią z wiatru i słońca. Jednak w Europie, gdzie niedobory wiatru i słońca mogą trwać dni, tygodnie, a nawet miesiące, to nie wystarczy. Dlatego przejściowo sieć powinny stabilizować szczytowe elektrownie gazowe (OCGT). Należy je odróżniać od bloków gazowo-parowych (CCGT), których wydajność jest dość bliska teoretycznej wydajności termodynamicznej, a dodatkowo ciepło odpadowe może zostać wykorzystane do ogrzewania systemowego. Tak wysoka wydajność wynika stąd, że spalany gaz napędza najpierw turbinę gazową, a odpadowe ciepło używane jest do produkcji pary, napędzającej turbinę parowe. Takie bloki były masowo uruchamiane w Europie, zwłaszcza w Niemczech, ale także w Polsce. Za ich popularność odpowiedzialna była fałszywa filozofia, oparta na wzorze chemicznym, a nie realizmie, niestety wspierana odpowiednimi przepisami dotyczącymi szacowania emisji. Energia z gazu ziemnego pochodzi ze spalania czterech atomów wodoru i tylko jednego atomu węgla.

Nie ulega więc wątpliwości, że mniej CO₂ jest produkowane, jeśli spalany jest gaz ziemny, a nie węgiel (choć nie jest to czysty węgiel, zawiera też węglowodory). Wpływ na klimat jest jednak nie tak jednoznaczny, proste zastąpienie węgla gazem wymaga ogromnych jego ilości, a wydobycie i przesył przy obecnych technologiach prowadzą do dużych emisji metanu, potężnego gazu cieplarnianego. Ponadto tak wielkie ilości gazu przy dużym niedoborze własnego wydobycia w Europie powodują uzależnienie od importu, czego skutki obserwujemy po zaatakowaniu Ukrainy przez Rosję. W dodatku elektrownie gazowo-parowe są kosztowne, a więc ich amortyzacja będzie trwać długo, zwłaszcza przy rosnących kosztach kapitału. Będzie to prowadzić do nacisku na ich długie użytkowanie, poza horyzont czasowy, za którym nie będą już potrzebne.

Szczytowe elektrownie gazowe są znacznie prostsze i tańsze, gdyż produkują energię tylko z pomocą turbin gazowych. Z tego powodu są też znacznie mniej wydajne, co może wydawać się wadą, jeśli zapomni się o słowie „szczytowe”. Ich zaletą jest bardzo proste i szybkie uruchamianie, rzędu 10 minut. Podobnie jak elektrownie szczytowo-pompowe mogą być uruchamiane zdalnie przez dyspozytora mocy. Będą więc pracować stosunkowo krótko, co z nawiązką zrekompensuje ich niższą wydajność z punktu widzenia emisji. W dodatku już dziś mogą one pracować na gazie ziemnym z dodatkiem wodoru, a w przyszłości, po modernizacji, na czystym wodorze. Jest pewien ekonomiczny problem z gazowymi elektrowniami szczytowymi. Im rzadziej i krócej będą one pracować, co jest ideałem z punktu widzenia ograniczania emisji, tym dłużej będą się amortyzować. Są one zatem komercyjnie nieopłacalne i trudno będzie znaleźć inwestorów, zwłaszcza przy rosnących kosztach kapitału. Ich budowa powinna być dofinansowywana z opłat sieciowych, gdyż ich głównym zadaniem jest stabilizacja sieci, a nie produkowanie dużej ilości energii. Ponieważ będą sprzedawać energię w czasie jej niedostatku, uzyskiwana cena powinna być na tyle wysoka, by rekompensować niższą wydajność i częstą lub nawet dominującą bezczynność. Zatem bieżące koszty, nie obejmujące amortyzacji, powinny być niższe od przychodów.

Stabilizacja sieci bez dużych stabilnych i dyspozycyjnych źródeł jest, przynajmniej obecnie, niewyobrażalna. Kraje bogate w wodę mogły za takie uważać hydroelektrownie, ale zmiany klimatu powodują niedobory wody i spadek mocy. Jeśli odrzucimy elektrownie węglowe i powinniśmy odrzucić także elektrownie gazowo-parowe, pozostają jedynie bezemisyjne przecież elektrownie jądrowe. Energetyka jądrowa powinna rozwijać się w trzech kierunkach. Najtańsza jest rewitalizacja elektrowni, które skończyły lub kończą pracę. Obecny kryzys energetyczny skłonił władze Kalifornii do przedłużenia pracy ostatniej czynnej elektrowni jądrowej^{xv}. Szkoda, że Niemcy i Szwedzi nie mogą zdecydować się na podjęcie takiej racjonalnej decyzji. Najprawdopodobniej zintensyfikowana będzie budowa dużych elektrowni jądrowych, gdyż jest to technologia całkowicie dojrzała. Po wielu latach zwłoki decyzję o budowie elektrowni jądrowych podjęły

władze i sektor prywatny w Polsce. Duże nadzieje wiązane są z małymi modułowymi elektrowniami jądrowymi (*small modular reactors*, SMR), wytwarzanymi w dużej części seryjnie w fabrykach, ale technologia ta nie została jeszcze wypróbowana w praktyce. Jedną z zalet SMR-ów jest możliwość ich lokalizowania w miejscu zamykanych elektrowni węglowych, a w przyszłości gazowych, co umożliwiłoby wykorzystanie istniejącej infrastruktury, w tym sieci przesyłowej. Istnieje też możliwość ich lokalizacji w miejscu działających obecnie elektrociepłowni, co umożliwiłoby wykorzystanie ciepła odpadowego do ogrzewania. Warunkiem będzie w tym przypadku akceptacja społeczna, która generalnie bardzo wzrosła w stosunku do elektrowni jądrowych, ale może być niewystarczająca dla lokalizacji SMR-ów w pobliżu lub na terenie miast.

Są jednak pewne problemy z energetyką jądrową. Istniejące elektrownie wykorzystują często rzeki lub duże jeziora do chłodzenia, o ile w pobliżu nie ma morza. Zmiana klimatu spowodowała już problemy z chłodzeniem ostatniego lata – z powodu niskiego poziomu i wysokiej temperatury wody w rzekach produkcja energii z elektrowni jądrowych była znacznie niższa w stosunku do poprzednich lat, co wraz z obniżeniem produkcji energii w hydroelektrowniach było dodatkową przyczyną wysokich cen energii w Europie. Warto zaznaczyć, że podobne problemy miały elektrownie ciepłne oparte na węglu i gazie. Spodziewamy się, że okresowy niedostatek wody do chłodzenia elektrowni ciepłych, w tym jądrowych, będzie się nasilać. Należy zatem szczególnie starannie planować ten aspekt funkcjonowania elektrowni ciepłych.

Pozornie odpowiednie zwiększenie tempa rozwoju energetyki jądrowej nie powinno być problemem, jednak w ostatnich trzech dekadach rozwój tej branży był hamowany przez aktywność ruchów społecznych, tzw. zielonych, w związku z czym moce konstrukcyjne zostały uśpione. Uruchomienie w tych warunkach odpowiednich dodatkowych mocy wiązać się będzie z ogromnymi nakładami finansowymi, które konkurować będą z nakładami na wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych.

Przy każdym kryzysie energetycznym uaktywniają się fizycy pracujący nad pozyskaniem energii z fuzji jądrowej. Należy podchodzić sceptycznie do ich obietnic bezemisyjnego dostarczania praktycznie wkrótce nieograniczonych ilości energii. Prace nad kontrolowaną fuzją trwają już bardzo długo, postęp jest powolny i na pewno fuzja jądrowa nie odegra roli w obecnej rewolucji energetycznej. Na razie musimy korzystać z fuzji, która odbywa się na Słońcu – bezpośrednio poprzez fotowoltaikę, pośrednio przez wiatr i biomasę.

Transformacja energetyczna – problem sieci

Transformacja energetyczna to nie tylko nowe bezemisyjne źródła i magazynowanie energii, ale także przebudowa i rozbudowa sieci przesyłowych. Zaniedbania w tej dziedzinie są widoczne w całym świecie, a w Polsce są one bardzo znaczne. Do przeszłości

należą czasy, gdy energia płynęła jednokierunkowo od dużych producentów do odbiorców. Aktualnie produkcja energii jest bardziej rozproszona, a przepływ jest dwukierunkowy, także na odcinkach prowadzących bezpośrednio do odbiorców, coraz częściej będących prosumentami. Zmiana ta wymaga nie tylko rozbudowy kluczowych odcinków stanowiących wąskie gardła, ale także stopniowego przekształcania sieci w tzw. sieci inteligentne.

Aktualną sytuację sieci energetycznej w Polsce przedstawia tabela 1. Jeśli zostaną zrealizowane mało ambitne plany rozbudowy sieci do roku 2027, to możliwe będzie uzgodnione już przyłączenie zaledwie 4,2 GW farm wiatrowych i 4,7 GW farm fotowoltaicznych. Biorąc pod uwagę, że jest to moc szczytowa, potencjał wytwarzania energii trzeba podzielić z grubsza przez trzy, czyli będzie to równoważne zaledwie 3 GW łącznie dla wiatru i słońca, gdyby te źródła działały w sposób ciągły i równomierny. Jest to zdecydowanie za mało, by w sposób zasadniczy zmienić mikś energetyczny Polski. Do rozdysponowania jest jeszcze rezerwa 1,7 GW rozmieszczona nierównomiernie, w dodatku w rejonach niezbyt korzystnych z punktu widzenia energii produkowanej z wiatru i słońca (tabela 1). Nie należy się zatem dziwić, że większość wniosków o przyłączenie nowych OZE jest obecnie odrzucana. W mediach takie odmowy są zwykle komentowane jako próba hamowania rozwoju OZE, wydaje się jednak, że jest to przede wszystkim wynikiem niewydolności sieci. Zatem przyspieszenie transformacji energetycznej wymaga radykalnego przyspieszenia modernizacji sieci. Większość środków pozyskiwanych ze sprzedaży uprawnień do emisji CO₂ powinna być przeznaczona na ten cel, obejmujący również inwestycje w urządzenia służące stabilizacji sieci, takie jak część magazynów energii, szczytowe elektrownie gazowe i elektrolizery zabezpieczające system przed skutkami nadmiaru energii ze słońca i wiatru dla stabilności sieci. Środki pozyskiwane ze sprzedaży uprawnień do emisji są obecnie znaczne ze względu na wysoką cenę giełdową świadectw. W roku 2021 do polskiego budżetu trafiło z tego tytułu 25 mld zł, w roku 2022 można spodziewać się nieco wyższych wpływów. Gdyby nawet cała ta kwota została wydana na cele klimatyczne, a rząd jest zobowiązany do takiego wydatkowania tylko połowy, i cała była przeznaczona na rozwój sieci, środki mogłyby okazać się niewystarczające, co oznacza, że znaczną część kosztów będą musieli pokryć odbiorcy energii, zwłaszcza, jeśli nie uzyskamy lub nie uzyskamy w pełni unijnych środków w ramach Krajowego Planu Odbudowy (KPO).

Przedstawione wyżej ograniczenia możliwości przyłączania OZE do sieci nie dotyczą prosumenckiej fotowoltaiki. Nadmiarowa energia produkowana przez prosumentów trafia do systemu energetycznego Polski, za który odpowiadają Polskie Sieci Energetyczne S.A. (PSE), poprzez sieci dystrybucyjne^{xvi}. Nie zawsze może ona być przyjęta w całości w okresach najintensywniejszej produkcji. Brak możliwości odbioru energii z danej instalacji fotowoltaicznej skutkuje wzrostem napięcia i w konsekwencji wyłączeniem

zeniem instalacji. Stratę ponosi w takim przypadku prosument. Problem może być częściowo złagodzony poprzez instalację magazynów energii przez prosumentów, ale docelowo właściciel sieci dystrybucyjnej powinien instalować magazyny energii w newralgicznych węzłach.

Tabela 1. Uzgodnione przyłączenia OZE w MW oraz pozostająca do wykorzystania moc przyłączeniowa w roku 2027, przy założeniu, że zostaną zrealizowane plany rozbudowy sieci energetycznej. Według raportu Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE)^{xvii}. Dane dotyczą jedynie sieci 220 i 400 kV, za które odpowiadają PSE. Ograniczenia w przyłączaniu występują także na poziomie sieci dystrybucyjnych 110 kV i sieci lokalnych

Obszar lub podobzar	Uzgodnione przyłączenia		moc dostępna
	wiatr	fotowoltaika	
Pomorze Zachodnie	555,1	467,7	0
Pomorze Wschodnie	521,0	479,8	0
Warmia-Podlasie	226,0	271,2	0
Wielkopolska-Kujawy	674,8	586,6	0
Mazowsze	303,5	135,8	300
Ziemia Lubuska-Łużyce	258,2	1305,4	0
Wrocław-Opole	435,3	366,4	0
Centrum	407,5	83,8	80
Wschód	609,7	619,2	350
Południe	191,4	181,8	550
Małopolska	0,7	244,1	450
Polska	4183,1	4741,9	1730

Przedstawiona w tabeli 1 sytuacja w zakresie przyłączania nowych źródeł energii nie obejmuje przyszłej elektrowni jądrowej zlokalizowanej w Lubiatowie-Kopalnej i farm wiatrowych na morzu. Zapewnienie odbioru energii z tak potężnych źródeł będzie wielkim wyzwaniem, zwłaszcza że duża część tej energii będzie używana na południu kraju. Podobzar Pomorze Wschodnie najprawdopodobniej powinien zostać połączony z odpowiednimi węzłami w centralnej i południowej Polsce potężną magistralą stałoprądową (*high voltage direct current*, HVDC), gdyż przesył prądu stałego obciążony jest mniejszymi stratami niż przesył prądu zmiennego, a cała instalacja jest tańsza przy kilkuset-kilometrowych odległościach (Wang i Redfern 2010).

Dekarbonizacja transportu

Drogi dekarbonizacji transportu drogowego, będącego źródłem aż 74% emisji pochodzących z transportu^{xviii}, są klarowne: zwycięży napęd elektryczny, bateryjny lub oparty na produkcji energii elektrycznej z wodorowych ogniw paliwowych. W chwili obecnej wydaje się, że napęd bateryjny będzie bardziej popularny w samochodach oso-

bowych i dostawczych, a także w autobusach miejskich. Natomiast napęd oparty na ogniwach paliwowych powinien zdominować autobusy dalekobieżne, towarowy transport drogowy dalekiego zasięgu i niezelektryfikowane koleje. Obie technologie są dojrzałe i w obu przypadkach decydującą rolę odegra rozwój sieci ładowania i sieci tankowania wodoru. Jak zwykle prognozowanie bardziej odległej przyszłości jest zawodne. Produkcja i sprzedaż osobowych samochodów elektrycznych rozwija się błyskawicznie, znacznie szybciej niż przewidywano, bardzo szybki jest też rozwój sieci ładowania w wielu krajach. Jeśli w przyszłości na potrzeby transportu towarowego i autobusów dalekobieżnych rozwinie się sieć tankowania wodoru, może okazać się, że napęd wykorzystujący ogniwa paliwowe stanie się atrakcyjny także dla samochodów osobowych, ze względu na znacznie krótszy czas tankowania niż ładowania samochodów elektrycznych.

Polska powinna mocno przyspieszyć rozwój sieci stacji ładowania samochodów elektrycznych, powinien on wyprzedzać powiększanie się floty samochodów osobowych. Fotowoltaika prosumencka w Polsce rozwija się bardzo szybko, a samochody elektryczne wkrótce, po przewidywanym spadku ceny, będą szczególnie atrakcyjne dla prosumentów. Samochody ładowane z sieci, a nie własnej fotowoltaiki, przyczyniają się w Polsce w znacznie mniejszym stopniu do obniżania emisji, gdyż energia elektryczna jest produkowana w stosunkowo niewielkim stopniu z OZE. Aktualnie Polska znajduje się na piątym miejscu od końca w Unii Europejskiej pod względem udziału samochodów elektrycznych i hybryd ładowalnych wśród nowo rejestrowanych samochodów w 2021 r., a pod względem udziału samochodów elektrycznych na przedostatnim miejscu. Przoduje pod tym względem Norwegia, w której 64% nowych samochodów to „elektryki”, a łącznie z ładowalnymi hybrydami aż 86%^{xix}. W Unii Europejskiej procentowo największy udział samochodów elektrycznych wśród nowo rejestrowanych występował w Niderlandach i Danii, a w liczbach bezwzględnych w Niemczech i Francji^{xviii}.

Nie wiadomo jeszcze, jak będzie wyglądać dekarbonizacja transportu lotniczego. Na szczęście udział emisji z tego sektora wynosi tylko około 2% wszystkich emisji i tylko 12% emisji, których źródłem jest transport^{xviii}. Dojrzałą technologią jest stosowanie biopaliw lotniczych, które są drogie, a równocześnie nie do końca neutralne klimatycznie. Są też próby stosowania w samolotach wodoru lub płynnego metanu, który może być produkowany syntetycznie z zastosowaniem CO₂ wycofywanego z obiegu, ale są to badania na wczesnym etapie.

Dekarbonizacja transportu morskiego to też bardziej odległa przyszłość, choć z nieco innych powodów. Technicznie dużo łatwiej jest zastąpić olej napędowy innymi paliwami, niż zmienić paliwo lotnicze, ale nowe statki są bardzo drogie i mają bardzo długi okres eksploatacji^{xx}. Jeśli nawet w najbliższych latach rozpoczęto by produkcję statków używających „zielone” paliwa, stara flota będzie jeszcze długo używać oleju napędowego. Jedynym rozwiązaniem jest przestawienie się tych statków na paliwo syntetyczne,

możliwie „zielone”. Na szczęście towarowy transport morski jest odpowiedzialny jedynie za około 3% emisji.

Dekarbonizacja przemysłu

W odróżnieniu od transformacji energetycznej i dekarbonizacji transportu, dekarbonizacja przemysłu jest na bardzo wczesnym etapie, gdyż technologie są niedojrzałe. Choć trwają bardzo intensywne prace badawcze, opóźnienia wydają się nieuniknione. Jednak w literaturze aż roi się od pomysłów, czasami zaskakujących. Podam tylko jeden przykład. Przy produkcji nawozów azotowych gaz ziemny jest używany zarówno jako źródło energii cieplnej, jak i surowiec, a w efekcie procesu chemicznego wydziela się dwutlenek węgla jako produkt uboczny. Energię cieplną można dostarczyć z innego źródła, na przykład wodoru, ale uniknięcie emisji z procesu chemicznego uznawano za nieuniknione i jedynym rozwiązaniem wydawało się wychwytywanie i magazynowanie CO₂. Johansen i inni (2022) znaleźli sposób, by przekształcać katalitycznie azot cząsteczkowy (N₂) w amoniak (NH₃). Niestety są to na razie jedynie badania laboratoryjne i niekoniecznie muszą się one sprawdzić w masowej produkcji i na pewno nowy proces technologiczny nie zastąpi szybko dotychczasowego.

Trwają bardzo intensywne prace nad ograniczeniem emisji w hutnictwie żelaza (obecnie 6,5% globalnej emisji CO₂), metali nieżelaznych oraz cementu (7% emisji) (Fennell i inni 2022). W tych przemianach dużą rolę odgrywać będzie energia elektryczna i wodór. Już dziś cementownie używają jako źródła energii nienadających się do recyklingu odpadów. Jak pisałem wyżej, choć paliwo takie jest ciągle klasyfikowane jako odnawialne, jego użycie zmniejsza jedynie emisję CO₂, lecz jej nie eliminuje. Jest też możliwe stosowanie biomasy czy węgla drzewnego jako paliwa, choć na razie są dla tych paliw lepsze zastosowania. W przypadku hutnictwa poza eliminacją paliw kopalnych jako źródła ciepła niezwykle istotne jest zwiększenie udziału złomu w produkcji. W przypadku cementu wychwytywanie CO₂ z procesu chemicznego, przy jednoczesnym wyeliminowaniu paliw kopalnych jako źródła energii, może przekształcić cement, a właściwie powstający z niego beton, ze źródła emisji w pochłaniacz emisji (Fennell i inni 2022). Wynika to stąd, że beton pochłania dwutlenek węgla z atmosfery. Proces ten zależy od powierzchni styku z atmosferą, więc w celu przyspieszenia reakcji konieczne jest rozdrabnianie starych betonowych konstrukcji. Dziś jest to nieopłacalne ekonomicznie, a także z punktu widzenia emisji – potrzebna energia tylko w niewielkiej części powstaje bezemisyjnie. Można mieć jedynie nadzieję, że po zakończeniu transformacji energetycznej rozwiną się technologie rozdrabniania betonu przy równoczesnym odzyskiwaniu stali zbrojeniowej.

Istnieje wiele niewspomnianych tutaj produktów wymagających dekarbonizacji. Jednak produkcja metali, cementu i nawozów sztucznych, wraz z produkcją etylenu,

podstawowego surowca w produkcji tworzyw sztucznych, są odpowiedzialne za lwią część emisji CO₂ w przemyśle.

Dekarbonizacja ogrzewania i chłodzenia

Dekarbonizacja ogrzewania i chłodzenia budynków mieszkalnych i usługowych jest wielkim problemem nie z przyczyn technicznych, lecz ze względu na skalę i trwałość już istniejących budynków, nie zawsze energooszczędnych. Problem musi być rozwiązywany inaczej w przypadku budynków nowo budowanych, a inaczej w przypadku budynków już istniejących, często starych.

Nowe budynki powinny być przede wszystkim energooszczędne. Doświadczenie pokazuje, że energooszczędność trzeba wymusić poprzez przepisy budowlane. Argumenty, że dziś trzeba zapłacić wyższą cenę, ale zwróci się to w przyszłości, są najczęściej rozstrzygane na korzyść niższej ceny. Przykładem może być brak w polskim prawie budowlanym wymogu rekuperacji, czyli odzyskiwania ciepła lub „chłodu” traconego z budynku przez wentylację. Pytałem kilku „budujących się” znajomych o rekuperację i odpowiedź była zawsze taka sama: to jest za drogie. W Norwegii nie można dostać pozwolenia na budowę bez zaprojektowanej rekuperacji, gdyż właśnie przez wentylację traci się najwięcej energii, zwłaszcza, jeśli ściany są dobrze izolowane, co jest na szczęście wymagane nawet w polskim prawie budowlanym.

Jakiś czas temu było głośno na temat tzw. budynków pasywnych, czyli prawie nie pobierających z zewnątrz energii. Przyjęto, że budynek taki powinien zużywać na ogrzewanie nie więcej niż 15 kWh/m²/rok. Są to jednak rozwiązania niszowe, gdyż najtrudniej i najdrożej jest wyeliminować ostatnie 10–20% strat energii. Postuluje się raczej budowę domów energooszczędnych o nieco wyższym zużyciu energii.

W ostatnich latach bardzo popularne stały się pompy ciepła, które rozwiązują problem ogrzewania, chłodzenia i ewentualnie, w zależności od zastosowanego rozwiązania, także produkcji ciepłej wody użytkowej. Najczęściej polecane są obecnie pompy czerpiące ciepło z powietrza, gdyż są proste w montażu – nie wymagają skomplikowanych prac ziemnych. Ich wadą jest głośność, jest więc problem z montowaniem ich w zwartej zabudowie. Jest to natomiast świetne rozwiązanie dla rozproszonego budownictwa jednorodzinne.

Pompy ciepła zużywają energię elektryczną, a ich wydajność, mierzona stosunkiem energii pozyskanej do energii włożonej, jest uzależniona od różnicy temperatur. Dlatego można dogrzewać mieszkania zwykłym klimatyzatorem ściennym, który jest przecież pompą ciepła, przy zewnętrznej temperaturze kilkunastu czy kilku stopni. Jednak w okresie mrozów potrzebne są znacznie potężniejsze urządzenia.

Z czasem coraz więcej pomieszczeń będzie ogrzewanych pompami ciepła, nie rozwiąże to jednak wszystkich problemów, zwłaszcza w przypadku zwartej zabudowy

w miastach. Obecnie popularne jest centralne ogrzewanie systemowe, wykorzystujące ciepło odpadowe z produkcji energii elektrycznej w elektrowniach ciepłych (tzw. ciepło kogeneracyjne). Polska należy do liderów w tej dziedzinie. Obecnie funkcjonują elektrociepłownie opalane węglem lub, coraz częściej, gazem. Co będzie, gdy w miarę dekarbonizacji paliwa kopalne będą wycofywane? Możliwym omawianym już wyżej rozwiązaniem jest instalacja SMR-ów w miejsce istniejących elektrociepłowni. Rozważane jest stosowanie potężnych pomp ciepła, które byłoby rozprowadzane przez układ systemowego ogrzewania. Dla podniesienia wydajności potrzebne są możliwie wysokie tzw. dolne źródła ciepła – np. kanalizacja, ciepło z serwerowni, ciepło odprowadzane przez układ wentylacji kopalń, metra, hal przemysłowych itp. Źródłem dolnym mogłyby być też nieczynne kopalnie, także te, w których dopuści się samorzutne zalanie wodą. W obszarach nadmorskich dolnym źródłem ciepła mogłoby być morze. Rozważa się budowę magazynów ciepła, które mogłyby być zasilane ciepłem powstającym w okresie chłodzenia. Generalnie, będą to źródła rozproszone, więc ich integracja będzie nie lada wyzwaniem technicznym. Przejście na tego rodzaju ogrzewanie wymagać będzie też zmiany na ogrzewanie niskotemperaturowe, o temperaturze nieprzekraczającej 50 stopni, a optymalnie 30-40 stopni, co wiązałoby się z koniecznością prac adaptacyjnych u odbiorców.

Część ludzi będzie dalej korzystać z klasycznego ogrzewania elektrycznego, nie należy się jednak spodziewać gwałtownego przyrostu takich instalacji ze względu na koszty. W Polsce dodatkowym utrudnieniem w rozwoju ogrzewania elektrycznego są jednolite ceny energii lub co najwyżej dwie stałe ceny w ciągu doby. Uniemożliwia to optymalne wykorzystywanie energii w okresach, gdy jest ona tania, a w przyszłości, gdy OZE będą dominować, będzie miała niekiedy ceny ujemne.

Miejmy nadzieję, że ogrzewanie węglem zostanie w miarę szybko wyeliminowane, nie tylko z powodu niekorzystnego wpływu na klimat, ale także smogu i problemów z dostępnością węgla. Natomiast ogrzewanie gazem nieprędko zniknie. Biorąc pod uwagę bardzo szybki wzrost liczby klimatyzatorów, także w dużych budynkach, można spodziewać się upowszechniania modelu mieszanego – przy wyższych temperaturach ogrzewanie klimatyzacją, przy niższych gazem.

Ponieważ chłodzenie jest prawie zawsze oparte na energii elektrycznej, a ogrzewanie wymagać będzie coraz więcej energii elektrycznej, ten sektor gospodarki znacznie przyczyni się do wzrostu zapotrzebowania na energię, co powinno być brane pod uwagę przez planistów.

Wycofywanie dwutlenku węgla z atmosfery

Dekarbonizacja gospodarki postępuje i będzie postępować, jednak proces ten jest zbyt wolny, by wystarczył do utrzymania wzrostu średniej temperatury o nie więcej niż

1,5 stopnia do końca XXI wieku. Ponadto nie wszystkie emisje będzie można wyeliminować. Konieczne jest zatem wycofanie pewnej ilości dwutlenku węgla z atmosfery. Teoretycznie istnieją dwie możliwości: pierwsza, to wychwytywanie go metodami chemicznymi i magazynowanie; druga, to dokonanie tego siłami natury. Pierwszy sposób jest niestety zbyt drogi i dlatego nie wyszedł dotąd poza fazę eksperymentalną, choć ciągle ma przyszłość. Jeśli nawet magazynuje się dwutlenek węgla, to pochodzi on z procesów przemysłowych, a jedynym ekonomicznie opłacalnym obecnie sposobem jest wyciskanie z jego użyciem resztek ropy naftowej z wyeksploatowanych pokładów.

Dwutlenek węgla jest wiązany przez minerały. Krzemiany w skałach magmowych są zastępowane przez węglany w szczelinach, do których dociera woda zawierająca rozpuszczony dwutlenek węgla (Snæbjörnsdóttir i inni 2020). Szybkość tego procesu zależy od powierzchni styku i w warunkach naturalnych rezultaty są widoczne w geologicznej skali czasu, ale nie skali czasu kilkudziesięciu lat, która nas interesuje. Można ten proces przyspieszyć przez zwiększenie powierzchni – rozdrobnione skały magmowe mogą być dodawane do gleby lub wody oceanicznej, co dodatkowo zmniejszyłoby jej zakwaszenie (Goll i inni 2021). Oczywiście proces musiałby być zastosowany w masowej skali, aby zmagazynować istotną ilość CO₂. Goll i inni (2021) oceniają, że rozproszczenie pyłu bazaltowego w ilości 5 kg/m² na powierzchni 55 mln km² pozwoliłoby na wiązanie 2,5 Gt CO₂ rocznie w ciągu 50 lat, nie tylko przez bezpośrednie wiązanie tego związku, ale też przez towarzyszące zwiększanie zawartości węgla w glebie. Bazaltu wprawdzie nie brakuje, ale przedsięwzięcie byłoby ogromne, gdyż sproszkować trzeba by 225 Gt bazaltu (dla porównania, węgla wydobywa się około 8 Gt rocznie). Jednak przy rozłożeniu procesu w czasie ilość ta byłaby mniej szokująca, a ponadto wyznaczony cel mógłby być znacznie mniej ambitny, bo nie jest to jedyna droga usuwania dwutlenku węgla z atmosfery.

Dwutlenek węgla może też być wiązany przez odpady górnicze. Przy kopalniach diamentów w Afryce Południowej powstają ogromne ilości odpadów mineralnych, które wyjątkowo dobrze chłoną dwutlenek węgla w sposób naturalny, a proces ten można by znacznie przyspieszyć poprzez zapewnienie odpowiedniej wilgotności i dużej powierzchni styku z atmosferą (Mervine i inni 2018). Podobnie jest w przypadku kopalni niklu w Australii. Tamtejsza kopalnia w Mount Keith produkuje rocznie 11 Mt odpadów, co pozwalałoby związać 4 Mt CO₂, 10 razy więcej, niż wynosi emisja spowodowana wydobyciem (Power i inni 2014). Globalnie wydobycie niklu, platynowców, chromu i talku generuje około 419 Mt odpadów rocznie, które mogłyby związać około 175 Mt CO₂ (Power i inni 2014).

Skały bazaltowe pod dnem oceanów można też wykorzystać, wtłaczając w nie wodę nasyconą dwutlenkiem węgla dowolnego pochodzenia. Dwutlenek węgla jest wtedy wiązany w skali czasowej kilku lat. Gorszym rozwiązaniem jest magazynowanie gazo-

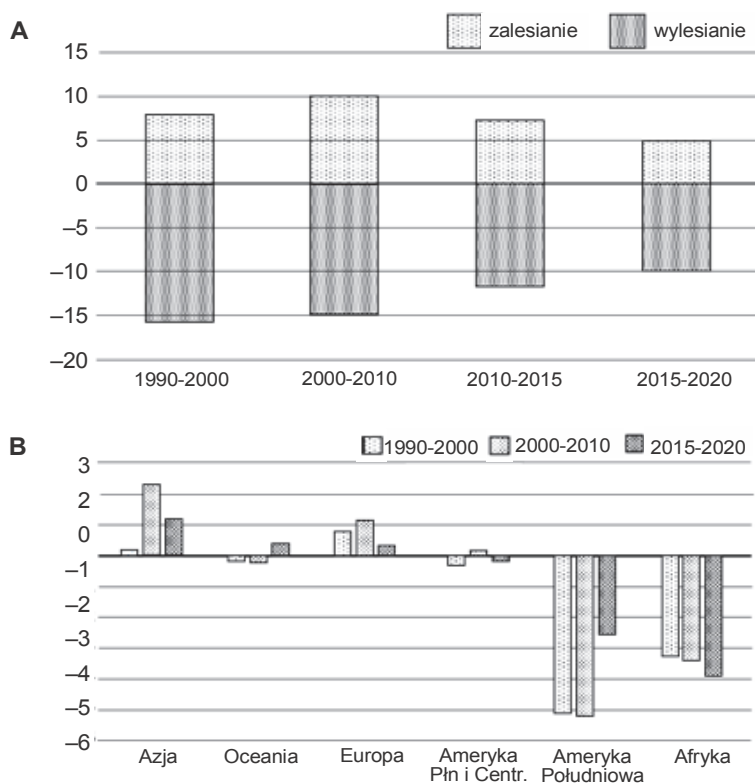
wego dwutlenku węgla ze względu na niebezpieczeństwo ucieczki gazu i o rzędy wielkości dłuższy czas potrzebny do związania przez bazalt.

Jest ciągle znaczny potencjał wykorzystania sił przyrody ożywionej do wychwytywania CO₂ z atmosfery. Zwiększenie wychwytywania dwutlenku węgla przez lasy jest możliwe poprzez zwiększenie powierzchni lasów, oddanie naturze części lasów i zmiany praktyk w gospodarce leśnej i rolnictwie. Niestety, choć powierzchnia lasów w Europie i Azji rośnie, to globalnie kurczy się (ryc. 5), co w sumie zwiększa emisję o około 4,5 Gt CO₂ rocznie^{xx}. Ubywa przede wszystkim lasów tropikalnych, najcenniejszych nie tylko dla zachowania bioróżnorodności, ale także będących ogromnym magazynem węgla. Dotyczy to też Azji, gdzie lasy tropikalne są zastępowane plantacjami drzew, zwłaszcza palmy olejowej. Lasy tropikalne są wycinane na potrzeby miejscowe i dla produkcji na eksport (ryc. 6). Potrzeby miejscowe dominują w Afryce, w mniejszym stopniu w Ameryce Łacińskiej i w jeszcze mniejszym w Azji (Pendril i inni 2022). Dla zahamowania wycinki lasów tropikalnych niezbędne jest zatem przyspieszenie procesu obniżania tempa wzrostu ludzkich populacji, co nie jest łatwe ze względu na dominację islamu i katolicyzmu w tych obszarach. Konieczne jest także zwiększenie intensywności produkcji rolnej na już zajętych pod uprawę terenach. Na wylesionych obszarach Ameryki Łacińskiej powstają głównie pastwiska, a w Azji plantacje palmy olejowej (Pendril i inni 2022). Jeśli ograniczymy spożycie wołowiny i skończymy z szaleństwem biopaliw pierwszej generacji, będziemy chronić lasy tropikalne.

Lasy powstają samorzutnie na porzuconych polach uprawnych, co znacznie zwiększa pochłanianie dwutlenku węgla z atmosfery. W Polsce jest takich lasów 1 mln hektarów, przybywa 20 tys. ha rocznie. Należy też zakładać plantacje drzew, by część lasów pozostawić naturze, a równocześnie utrzymać produkcję drewna na obecnym poziomie. Należy popierać zakładanie zadrzewień śródpolnych, co poprawia także produkcję rolną, i maksymalnie zazieleniać miasta i wsie. Lasy naturalne magazynują znacznie więcej węgla niż lasy użytkowe przede wszystkim w glebie, ale także w biomasie nadziemnej. Las zmierzający ku stanowi naturalnemu będzie magazynować węgiel przez kilkaset lat, a więc w skali czasu, która nas interesuje. Generalnie, trzeba odejść od paradygmatu lasu wielofunkcyjnego w kierunku lasów wyspecjalizowanych albo w kierunku magazynowania węgla, albo produkcji drewna, będzie jednak trudno przekonać do tego leśników. Konieczna jest też zmiana praktyk w leśnictwie – więcej sukcesji naturalnej, a mniej nasadzeń, aby przede wszystkim chronić węgiel związany w glebie. Zagadnienie najlepszego wykorzystania lasów w celu wiązania dwutlenku węgla omówiłem obszerniej w innym artykule opublikowanym w tym czasopiśmie (Kozłowski 2019).

Drewno jest surowcem powstającym bezemisyjnie, choć jego obróbka powodować będzie emisje do czasu wyeliminowania emisji z produkcji energii. Postulat rozdzielenia funkcji lasu nie zakłada eliminacji pozyskania drewna, a być może przy rozsądnej po-

lityce możliwe byłoby nawet jego zwiększenie, a przynajmniej obniżenie kosztów pozyskania. Drzewa rosną obecnie szybciej wskutek „nawożenia” dwutlenkiem węgla,



Ryc. 5. Powierzchnia wylesień i zalesień na świecie (A) i na poszczególnych kontynentach (B) wg danych FAO 2020^{xxi}

a w jeszcze większym stopniu wskutek antropogennie zwiększonej podaży związków azotowych. Drzewa iglaste, będące podstawą naszego przemysłu drzewnego, umierają też wcześniej wskutek zmian klimatycznych, prowadzących do częstych susz i coraz silniejszych huraganów. Rozsądek kazałby zatem obniżyć wiek rębny na terenach przeznaczonych na lasy produkcyjne. Jak się wydaje, na przeszkodzie stoi konserwatyzm większości leśników i kurczowe trzymanie się planów urządzania lasu sporządzanych w zupełnie innych warunkach. Ponadto technika łączenia fragmentów drewna tak się rozwinęła, że drewno użytkowe mogłoby pochodzić z młodszych drzew, które wyszły już z fazy najszybszego wzrostu. Zwiększyłaby się zatem rotacja, a należy pamiętać, że produkcja to stan biomasy pomnożony przez tempo rotacji. Umieściłem ten fragment w rozdziale poświęconym usuwaniu dwutlenku węgla z atmosfery, gdyż węgiel zawarty w trwałych wyrobach drewnianych będzie tam uwięziony przez dziesiątki lub nawet

setki lat, a na końcu będzie mógł być spożytkowany jako surowiec energetyczny.

Pozyskiwanie drewna w lasach górskich jest nieopłacalne, a nadleśnictwa utrzymują się na takich terenach dzięki dopłatom z funduszu leśnego, na który łożą nadleśnictwa, w których pozyskiwanie drewna jest wysoce opłacalne. Zatem lasy górskie, a przynajmniej ich znaczna część, powinny być oddane naturze i wyłączone z eksploatacji. Przemawia za tym nie tylko argument ekonomiczny. Lasy te pełnią niezwykle ważną funkcję ochrony przed powodzią, suszami i erozją, a ponadto są pojemnym magazynem węgla, który ciągle się powiększa. Niestety te argumenty nie trafiają do leśników, którzy w szybkim tempie wycinają Puszcę Karpacką, pomimo postulatów przyrodników utworzenia tam parku narodowego.

Do celów energetycznych powinny być przeznaczane tylko odpady drzewne. Początkowo spalano biomasę wyłącznie jako domieszkę do węgla w blokach węglowych, co jest bardzo złą praktyką, gdyż zmniejsza sprawność kotłów i najprawdopodobniej nie obniża emisji z paliw kopalnych lub obniża ją minimalnie. Obecnie spora ilość biomasy jest spalana w dedykowanych blokach. Praktyka taka ma ograniczony sens, jeśli spalanie jest prowadzone blisko miejsca produkcji biomasy, ale traci zupełnie sens, jeśli biomasa jest dowożona z dużej odległości, co musi wiązać się ze spalaniem paliw kopalnych. Niestety Elektrownia Połaniec ciągle spala mieszankę węgla i biomasy, a także chwali się największym na świecie blokiem o mocy 225 MW na mieszankę biomasy leśnej (80%, zrębki drewna) i agro (20%, odpady z produkcji rolnej, plantacji wierzby czy miskanta itp.), choć raczej jest to powód do wstydu niż dumy przy tak irracjonalnej wielkości bloku na biomasę i tak dużym udziale biomasy leśnej nie pochodzącej w całości z odpadów.

W przyszłości spalanie biomasy w celach energetycznych z wychwytem i magazynowaniem CO₂ ma być jedną z metod uzyskiwania tzw. negatywnej emisji, czyli wycofywania dwutlenku węgla z atmosfery. Na razie o wychwytywaniu CO₂ w polskich elektrowniach spalających biomasę nic nie słychać.

Jest lepszy sposób spożytkowywania zrębków drewna w celu uzyskania negatywnych emisji. Jest to piroliza drewna, czyli spalanie go przy ograniczonym dostępie powietrza. Produktami są gaz drzewny, czyli mieszanina wodoru i palnego tlenku węgla, oraz biowęgiel, o własnościach zbliżonych do węgla drzewnego. Gaz drzewny napędza generator prądu, a biowęgiel dodany do gleby będzie tam trwale zmagazynowany. Biowęgiel w glebie dzięki swoim właściwościom sorpcyjnym zmniejsza zapotrzebowanie na nawozy sztuczne, zwłaszcza na ubogich glebach, co dodatkowo przyczyni się do zmniejszenia emisji (Ennis i inni 2012, Hernandez-Soriano i inni 2016, Medyńska-Juraszek 2016, Rehman i Razzaq 2017, Timmons i inni 2017). Podsumowując, dwutlenek węgla z atmosfery wbudowany w drewno tylko częściowo wróci do atmosfery w procesie produkcji energii elektrycznej, a częściowo zostanie wycofany z obiegu na bardzo długi okres zalegania biowęgla w glebie.

Obecnie wiele słyszy się o sadzeniu drzew jako remedium na wzrost stężenia CO₂ w atmosferze i wynikające stąd zmiany klimatu. Jest to oczywiście dobra praktyka, ale dalece niewystarczająca dla zapobieżenia katastrofie klimatycznej. Neutralność klimatyczna jest obecnie w wielu krajach doskonałym chwytym reklamowym firm dbających o swój wizerunek. Najczęstszą praktyką jest obliczanie tzw. offsetu, czyli zrównoważenia własnych emisji wiazaniem dwutlenku węgla lub spowodowaniem zmniejszenia emisji w innym miejscu. Z kolei najczęściej obiecwanym lub oferowanym przez wyspecjalizowane firmy offsetem jest sadzenie drzew. Złośliwi twierdzą, że tymi obietnicami obsadzono już powierzchnię kilkakrotnie większą niż powierzchnia wszystkich łądów. Firmy powinny myśleć przede wszystkim o zmniejszeniu własnych emisji, a tam gdzie to jest na razie niemożliwe, także o innym offsecie. Jeszcze jakiś czas mogą to być inwestycje w neutralność klimatyczną w krajach, których nie stać na takie inwestycje w dostatecznej skali. Może to być też inwestowanie w opisane wyżej projekty wiazania dwutlenku węgla przez minerały.



Ryc. 6. Wylesianie pod uprawy przeznaczone na potrzeby miejscowe i eksport. Według Pendrill i inni (2022)

Aby zostawić więcej miejsca dla przyrody, niezbędne są zmiany w rolnictwie, które nie są łatwe do wdrożenia. Rolnictwo musi produkować więcej żywności na mniejszej powierzchni, przy mniejszym zużyciu nawozów sztucznych, przynajmniej do czasu gdy niemożliwa jest ich „zielona” produkcja, i przy lepszej ochronie węgla w glebie. A my wszyscy musimy marnować mniej żywności. Powinniśmy też jeść mniej mięsa, zwłaszcza wołowiny i jagnięciny, gdyż bydło i owce jako przeżuwacze emitują do atmosfery dużo metanu.

Czy zdążymy na czas?

Chociaż zmiany idą bez wątpienia w dobrym kierunku, są zbyt powolne, by obniżyć wzrost średniej temperatury ponad tą sprzed czasów preindustrialnych o nie więcej niż 1,5 stopnia przed końcem XXI wieku. Zmiany są zbyt powolne i najprawdopodobniej nie da się ich dostatecznie przyspieszyć z bardzo wielu powodów. Wydaje się, że świat jest

na trajektorii zmiany temperatury o 2,5 do 3 stopni. Oznacza to, że będziemy musieli borykać się, przynajmniej przejściowo, z bardzo groźnymi skutkami, czego zapowiedź mamy już obecnie. Grożą nam susze, powodzie, fale gorąca, a niekiedy zimna. W wyniku tych problemów klimatycznych pojawiać się będzie coraz więcej miejsc na Ziemi, gdzie nie da się lub będzie bardzo trudno żyć. Spowoduje to z kolei fale migracji liczonej już nie w milionach, ale w setkach milionów osób. Trudno dziś wyobrazić sobie skutki polityczne i społeczno-gospodarcze tak ogromnej migracji.

Miejmy nadzieję, że dekarbonizacja zakończy się powodzeniem, bo w przeciwnym razie czeka nas nieobliczalna katastrofa. Jeśli nie uda się w pełni osiągnąć celu do roku 2050, nie musi to przesądzić o klęsce, gdyż możemy usunąć sporo dwutlenku węgla z atmosfery nawet po tym terminie. Dlatego poświęciłem temu zagadnieniu sporo miejsca. Możemy też znacznie obniżyć stężenie metanu w atmosferze. Coraz więcej krajów deklaruje obniżenie emisji metanu do roku 2030 o 30% w stosunku do stanu w roku 2020. Jest to inicjatywa podjęta podczas konferencji COP26 w Glasgow. Już 130 państw podjęło takie zobowiązanie, niestety nie ma wśród nich Polski^{xxii}. Jeśli ograniczony zostanie dopływ metanu do atmosfery, dość szybko pojawi się nowy niższy stan równowagi ze względu na krótki okres półtrwania tego związku. Nad przestrzeganiem zobowiązania metanowego w coraz większym stopniu czuwać będzie monitoring satelitarny, który już dziś wykrywa duże źródła emisji.

Co zmieniła wojna w Ukrainie w transformacji?

Agresja Rosji na Ukrainę, późniejsze odcięcie od dostaw surowców energetycznych z tego kraju, albo wskutek decyzji krajów Unii, albo wskutek decyzji Rosji, spowodowały ogromne zawirowania na rynku energii, wielki wzrost cen surowców i energii elektrycznej, a także obawy, czy energii i ciepła nie zabraknie tej zimy. Nie może więc dziwić, że proces dekarbonizacji uległ pewnemu zahamowaniu, natomiast myślenie o konieczności odejścia od paliw kopalnych wprost przeciwnie. Większość polityków zdała sobie sprawę, jak niebezpieczne jest uzależnianie się od dostaw paliw i jak wrażliwa jest cena energii od ceny surowców energetycznych na rynkach światowych. Natomiast energia ze słońca i wiatru jest w tej chwili najtańsza i nie wymaga importu surowców. W perspektywie kilku lat oczekiwane jest przyspieszenie, a nie opóźnienie dekarbonizacji, a zwłaszcza transformacji energetycznej. Należy się też spodziewać intensyfikacji prac nad rozwiązaniami, które uwolnią energię ze źródeł odnawialnych od kaprysów pogody poprzez postęp w magazynowaniu energii i rozwój gospodarki wodorowej.

Transformacji energetycznej nic nie jest w stanie zatrzymać, bo o dekarbonizacji źródeł energii nie decyduje już tylko troska o klimat, lecz prosty rachunek ekonomiczny – zwycięży energia produkowana w tańszy sposób (Garnaut 2022). Oczywiście troska o klimat wpływa na rachunek ekonomiczny przez nakładanie kosztów na emisję gazów

cieplarnianych. Sprawy zaszły tak daleko, że tego już też na szczęście nie da się zatrzymać, chyba że świat pogrążyłby się w kompletnym chaosie. Zresztą nawet bez takich opłat energetyka oparta na paliwach kopalnych szybko okazałaby się droższa, gdyby nie korzystała z różnorodnych subwencji i niemal bezkosztowego niszczenia środowiska.

Niestety grozi światu inne uzależnienie. Większość paneli fotowoltaicznych lub materiałów do ich produkcji dostarczają Chiny, które są dodatkowo największym odbiorcą tych paneli. Wiele surowców do produkcji turbin wiatrowych też pochodzi głównie z Chin. Taka sytuacja, zbliżona do monopolizacji, nie sprzyja stabilności i konkurencyjności rynku, a w przyszłości może grozić szantażem. Ten stan powinien możliwie szybko zostać zmieniony. Na przykład Australia ma świetne warunki, by produkować u siebie panele fotowoltaiczne na potrzeby własne i na eksport, w dodatku może szybko uczynić taką produkcję „zieloną” ze względu na praktycznie nieograniczoną dostępność energii ze słońca i wiatru (Garnaut 2022). Stany Zjednoczone mają też zasoby, by przejąć część produkcji paneli, a krajom Afryki Północnej brak tylko kapitału, który może przecież przyjść z zewnątrz. Australia jest ponadto bogata w złoża pierwiastków ziem rzadkich i metali nieżelaznych, co jest ważne w produkcji turbin wiatrowych, baterii i infrastruktury energetycznej.

Niestety nie wszyscy politycy dostrzegają konieczność zmian w kierunku dekarbonizacji. Do niedawna na szarym końcu dekarbonizacji wśród krajów rozwiniętych była Australia, która stawiała na rozwój oparty na węglu, co doprowadziło do stagnacji w ekonomii. Po kwietniowych wyborach i zmianie władzy w rządzie federalnym polityka klimatyczna zmieniła się radykalnie i Australia ma plan, by zostać liderem dekarbonizacji (Garnaut 2022). Jak się wydaje, konieczność dekarbonizacji była jednym z ważnych haseł programowych, które doprowadziły do zdecydowanego zwycięstwa opozycji. Teraz na szarym końcu jest Polska. W naszym kraju słyszy się głosy, zwłaszcza wśród polityków Solidarnej Polski, o szalonej polityce klimatycznej Unii Europejskiej i konieczności powrotu do węgla. Oczywiście zostały popełnione pewne błędy, o których pisałem wyżej, ale największym błędem było rozpoczęcie procesu za późno i prowadzenie go zbyt wolno. Gdyby w Unii było już więcej energii odnawialnej, ceny energii byłyby znacznie niższe, a uzależnienie od surowców z Rosji mniejsze. Obecna sytuacja przejściowo może zwiększyć zużycie węgla, ale w perspektywie nie dłuższej niż kilku lat. Ostatecznie kryzys energetyczny wymusi oszczędzanie energii i przyspieszy rozwój energetyki bezemisyjnej.

Przy okazji należy sprostować fałszywe informacje rozpowszechniane przez Solidarną Polskę. Środki uzyskiwane ze sprzedaży uprawnień do emisji CO₂ nie są zabierane przez Unię, a trafiają do budżetu Polski i powinny być spożytkowywane w minimum 50% na wspieranie rozwiązań służących dekarbonizacji. Nie są to środki małe, w 2021

wynosiły 25 mld zł. Propozycje Solidarnej Polski, by zawiesić opłaty za emisję CO₂ są samobójcze: wprawdzie przejściowo zmniejszyłaby się cena energii, ale utrwaliłby się bardzo niekorzystny system energetyczny, oparty w większości na węglu, którego i tak brakuje, a zatem wzrosłaby zależność energetyki od importu surowców. Twierdzenie, że można w sposób istotny zwiększyć wydobycie węgla w Polsce, jest pozbawione podstaw ekonomicznych i technicznych – polski węgiel musi mieć wysoką cenę ze względu na głębokość pokładów i drogą siłę roboczą. Zniesienie opłat za emisję CO₂, zmniejszyłoby ponadto konkurencyjność energii z wiatru i słońca, obecnie tańszej od energii z węgla, zahamowałoby rozwój OZE w Polsce i utrwaliło wysokie ceny energii. Postulowane przez Solidarną Polskę jednostronne odejście Polski od handlu uprawnieniami do emisji byłoby natomiast *de facto* Polexitem.

Zakończenie

Rozwój ludzkości był zawsze zależny od energii. Nasi małpi przodkowie odżywiali się energią słońca zmagazynowaną w pokarmie roślinnym, co nie dawało dostatecznie dużo energii, by utrzymać duży mózg. W okresie tym pracę zapewniały tylko mięśnie. Przejście na dietę mieszaną, a zwłaszcza opanowanie ognia, umożliwiło rozwój mózgu, gdyż pokarm jest lepiej przyswajalny po obróbce cieplnej, a ponadto ogień zapewniał ciepło w zimne noce występujące nawet w tropikach. Możliwy był dalszy postęp, zależny już nie tylko od pracy mięśni, ale też energii spalania biomasy. Niestety nie wszystkie zmiany nazwalibyśmy dziś korzystnymi – późniejsze przejście ze zbieractwa i łowiectwa do rolnictwa i hodowli umożliwiło wykorzystywanie nie tylko pracy własnych mięśni, ale także mięśni niewolników, wliczając w to chłopów pańszczyźnianych. Zaczęto wykorzystywać też pracę mięśni zwierząt. Taki stan trwał długo, aż do ujarznienia energii pary, potem paliw ropopochodnych, gazu i elektryczności. Ludzkość weszła w okres niebywałego rozwoju ery industrialnej, niestety, jak się z czasem okazało, z fatalną konsekwencją wzrostu stężenia gazów cieplarnianych, nie mówiąc o innej dewastacji środowiska. Początkowo skutki były mało widoczne, ale zaczęły lawinowo przyspieszać, podobnie jak emisje, wraz z ciągle rosnącym zapotrzebowaniem na energię. Stan wiedzy rozwinął się na tyle, że zaczęto dostrzegać te konsekwencje i obecnie próbuje się im zapobiegać. Kilkadziesiąt lat za późno, by proces ten mógł przebiegać łagodnie i bez napięć. Dlatego mamy dziś wrażenie toczącej się nowej, pełnej napięć rewolucji energetycznej.

Tak naprawdę energia zawsze pochodziła ze słońca. Węgiel to energia roślin sprzed wielu milionów lat, ropa naftowa i zdecydowana większość gazu ziemnego są też pochodzenia organicznego. Tyle że te surowce energetyczne akumulowały się przez miliony lat, a zawarty w nich węgiel uwalniany jest teraz z zawrotną prędkością. Jesteśmy świadkami przechodzenia do kolejnej fazy czerpania energii ze słońca: bezpośrednio (fotowoltaika) lub pośrednio (wiatr). Rozwój techniki spowodował, że możemy ją czerpać

znacznie wydajniej niż rośliny, nie emitując przy tym dwutlenku węgla. Biomasa będzie dalej dostarczać pewne ilości energii, ale jej ilość możliwa do pozyskania w sposób zrównoważony jest zbyt mała, by zaspokoić ciągle rosnące potrzeby ludzkości.

Jeśli trwająca obecnie nowa rewolucja przemysłowa zakończy się sukcesem, to ludzkość czeka kolejne lata prosperity. Jeśli nie – czeka nas katastrofa. Konieczne wyrzeczenia, problemy i trud traktujmy więc jako inwestycje w przyszłość naszych dzieci i wnuków, a w przypadku osób młodych – także we własną. A osobom próbującym wkładać kij w szprychy procesu dekarbonizacji zadałbym pytanie: Nie macie dzieci lub wnuków i jesteście na tyle starzy, by nie warto wam było poświęcić odrobiny swojego komfortu dla przyszłości lepszej niż totalna, chociaż rozciągnięta w czasie, katastrofa?

Bibliografia

- Chen R., S. Kim, and Z. Chang. 2017. *Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications*.
- Ennis C.J., A.G. Evans, M. Islam, T.K. Ralebitso-Senior, E. Senior. 2012. *Biochar: Carbon Sequestration, Land Remediation, and Impacts on Soil Microbiology*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42: 2311–2364.
- Fennell P., J. Driver, C. Bataille, S. J. Davis. 2022. *Going net zero for cement and steel*. *Nature* 603: 574–577.
- Garnaut R. 2022. *The bridge to the superpower*. Str. 1–105 [w:] R. Garnaut, red. *The Superpower Transformation. Making Australia's zerocarbon future*. La Trobe University Press.
- Gates B. 2021. *Jak ocalić świat od katastrofy klimatycznej*. Wydawnictwo Agora, Warszawa.
- Goll D.S., P. Ciais, T. Amann, W. Buermann, J.J. Chang i inni. 2021. *Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock*. *Nature Geoscience* 14: 545–549.
- Hernandez-Soriano M.C., B. Kerre, P.M. Kopittke, B. Horemans, E. Smolders. 2016. *Biochar affects carbon composition and stability in soil: a combined spectroscopy-microscopy study*. *Scientific Reports* 6: 25127.
- Johansen C.M., E.A. Boyd, J.C. Peters. 2022. *Catalytic transfer hydrogenation of N₂ to NH₃ via a photoredox catalysis strategy*. *Science Advances* 8: eade3510.
- Kozłowski J. 2019. *Jak najlepiej wykorzystać lasy do sekwestracji dwutlenku węgla?* *Nauka* 2019 nr 4, 47–56.
- Lamb W.F., T. Wiedmann, J. Pongratz, R. Andrew, M. Crippa, J.G.J. Olivier, D. Wiedenhofer, G. Mattioli, A.A. Kouradajie, J. House, S. Pachauri, M. Figueroa, Y. Saheb, R. Slade, K. Hubacek, L. Sun, S.K. Ribeiro, S. Khennas, S. de la Rue du Can, L. Chapungu, S.J. Davis, I. Bashmakov, H. Dai, S. Dhakal, X. Tan, Y. Geng, B. Gu, J. Minx. 2021. *A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018*. *Environmental Research Letters* 16.
- Medyńska-Juraszek A. 2016. *Biowęgiel jako dodatek do gleb*. *Soil Science Annual* 67: 151–157.
- Mervine E.M., S.A. Wilson, I.M. Power, G.M. Dipple, C.C. Turvey, J. L. Hamilton, S. Vanderzee, M. Raudsepp, C. Southam, J.M. Matter, P.B. Kelemen, J. Stiefenhofer, Z. Miya, G. Southam. 2018. *Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada*. *Mineralogy and Petrology* 112: 755–765.

- Muller R.A., E.A. Muller. 2017. *Fugitive Methane and the Role of Atmospheric Half-Life*. Geoinformatics & Geostatistics: An Overview 05.
- Pendrill F., T.A. Gardner, P. Meyfroidt, U.M. Persson, J. Adams, T. Azevedo, M.G. Bastos Lima, M. Baumann, P.G. Curtis, V. De Sy, R. Garrett, J. Godar, E.D. Goldman, M. C. Hansen, R. Heilmayr, M. Herold, T. Kuemmerle, M. J. Lathuilliere, V. Ribeiro, A. Tyukavina, M.J. Weisse, C. West. 2022. *Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation*. Science 377: eabm9267.
- Power I., J. McCutcheon, A. Harrison, S. Wilson, G. Dipple, S. Kelly, C. Southam, G. Southam. 2014. *Strategizing Carbon-Neutral Mines: A Case for Pilot Projects*. Minerals 4: 399-436.
- Prather M.J., J. Hsu, N.M. DeLuca, C.H. Jackman, L.D. Oman, A.R. Douglass, E.L. Fleming, S.E. Strahan, S.D. Steenrod, O.A. Sovde, I.S. Isaksen, L. Froidevaux, B. Funke. 2015. *Measuring modeling the lifetime of nitrous oxide including its variability*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120: 5693-5705.
- Rehman H.A., R. Razzaq. 2017. *Benefits of Biochar on the Agriculture Environment – A Review*. Journal of Environmental Analytical Chemistry 4: DOI: 10.4172/2380-2391.1000207.
- Snæbjörnsdóttir S.Ó., B. Sigfússon, C. Marieni, D. Goldberg, S.R. Gislason, E.H. Oelkers. 2020. *Carbon dioxide storage through mineral carbonation*. Nature Reviews Earth & Environment 1: 90-102.
- Timmons D., A. Lema-Driscoll, G. Uddin. 2017. *The Economics of Biochar Carbon Sequestration in Massachusetts*. UMass Clean Energy Extension, University of Massachusetts.
- Wang H., M. Redfern. 2010. *The advantages and disadvantages of using HVDC to interconnect AC networks*. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC2010), Cardiff, UK.
- Wuebbles D.J., K. Hayhoe. 2002. *Atmospheric methane and global change*. Earth-Science Reviews 57: 177-210.

Źródła internetowe

- ⁱ <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- ⁱⁱ IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom 996 pp.
- ⁱⁱⁱ <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20180301STO98928/infografika-emisje-gazow-cieplarnianych-w-unii-europejskiej>
- ^{iv} <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- ^v Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier, J.G.J., Quadrelli, R., Riskez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E. CO₂ emissions of all world countries – JRC/IEA/PBL 2022 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/07904, JRC130363.
- ^{vi} <https://ourworldindata.org/contributed-most-global-co2>
- ^{vii} <https://www.statista.com/statistics/1177911/cumulative-co2-emissions-worldwide-by-region/>
- ^{viii} <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency>

- ^{ix} <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2020>
- ^x <https://www.forum-energii.eu/pl/analizy/transformacja-2022>
- ^{xi} <https://www.utilitydive.com/news/california-grid-operator-enhances-reliability-prospects-utility-battery-storage/627083/>
- ^{xii} <https://www.latimes.com/opinion/story/2022-09-13/california-electric-grid-batteries-heat-wave-september-2022>
- ^{xiii} <https://www.gov.pl/web/klimat/moc-zainstalowana-w-magazynach-energii>. Strona Ministerstwa Klimatu i Środowiska nie jest regularnie aktualizowana; doliczyłem 3 MW magazyn uruchomiony we wrześniu 2022 r. przez Tauron, a wymieniany na stronie Ministerstwa jako projekt.
- ^{xiv} <https://wysokienapiecie.pl/67151-wodne-elektrownie-szczytowe-moga-wrocic-z-wielka-pompa/>
- ^{xv} <https://arstechnica.com/science/2022/09/as-state-heats-up-california-extends-operation-of-its-last-nuclear-plant/>
- ^{xvi} Charakterystykę pięciu działających w Polsce sieci dystrybucyjnych można znaleźć w artykule W. Dołęgi (2019) Funkcjonowanie krajowej sieci dystrybucyjnej w aspekcie bezpieczeństwa dostaw energii, https://www.cire.pl/pliki/2/2019/artykul___funkcjonowanie_krajowej_sieci_dystrybucyjnej___wd.pdf
- ^{xvii} <https://www.pse.pl/dane-systemowe/praca-kse/informacje-ogolne/informacja-o-dostepnosci-mocy-przylaczeniowej>
- ^{xviii} [https://www.atag.org/facts-figures.html#:~:text=The%20global%20aviation%20industry%20produces,carbon%20dioxide%20\(CO2\)%20emissions.&text=Aviation%20is%20responsible%20for%2012,to%2074%25%20from%20road%20transport](https://www.atag.org/facts-figures.html#:~:text=The%20global%20aviation%20industry%20produces,carbon%20dioxide%20(CO2)%20emissions.&text=Aviation%20is%20responsible%20for%2012,to%2074%25%20from%20road%20transport)
- ^{xix} <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>
- ^{xx} <https://www.npr.org/2021/12/01/1060382176/shipping-industry-is-pressured-to-cut-pollution-caused-by-merchant-fleet>
- ^{xxi} <https://www.fao.org/3/ca8642en/ca8642en.pdf>
- ^{xxii} <https://www.globalmethanepledge.org/>

Difficult road to decarbonize economy

Global emissions have already reached a monstrous amount of 37 Gt of CO₂ per year, and the content of this gas in the atmosphere, which is 50% higher than in pre-industrial times, and other greenhouse gases is changing the climate, causing enormous risks for humanity. A complete decarbonization of the economy is essential. Currently, China, the US and the European Union as a whole emit the most, but the US and EU countries bear the greatest responsibility for the carbon dioxide already accumulated in the atmosphere. They are high GDP countries, so they have a moral obligation to help poorer countries decarbonize their economies. Most urgent is the decarbonization of the energy sector, which has a huge, if not the largest, share of emissions. In addition, decarbonizing other sectors will significantly increase demand for electricity. Fortunately, methods to decarbonize this sector are technically mature – only RES and nuclear power should remain. The only problems are time and money. Decarbonization of trans-

portation is proceeding faster than expected, through electromobility and the somewhat slower deployment of hydrogen fuel cells. More difficult is the decarbonization of industry, as the technologies are immature, although research in this direction has intensified greatly recently. Decarbonization of heating and cooling is a challenge not because there is a lack of methods to solve the problem, but because the scale of the undertaking is huge, especially since buildings have a long life span, and it is not always easy to change the heating in existing buildings. Despite the tremendous acceleration, it appears that the complete decarbonization of the economy by 2050, which is recommended by the IPCC to keep average temperature increases within a reasonably safe range, may not succeed. It will therefore be necessary to remove a significant amount of carbon dioxide from the atmosphere, which can be done either by capturing the gas and storing it, or by natural forces. One possibility is to accelerate the weathering of magmatic rocks, which would require grinding huge amounts of basalt and distributing it in soil over large areas. Action could also be taken to make forests store more CO₂. The war in Ukraine may reduce the rate of decarbonization on a very short time scale, but it is expected to accelerate the process. Politicians have realized how dangerous dependence on fossil fuels, especially their imports, is. In addition, energy prices, which are of such great concern to everyone now, would be much lower if the power industry was much more RES-based, as wind and photovoltaic currently provide the cheapest energy. There is no return to coal-based energy, and Polish politicians making such demands are acting against the Polish *raison d'etat*.

Key words: global emissions, decarbonizing the energy sector, decarbonizing transportation, decarbonizing industry, decarbonizing heating and cooling, removing carbon dioxide from the atmosphere, impact of the war in Ukraine on decarbonization