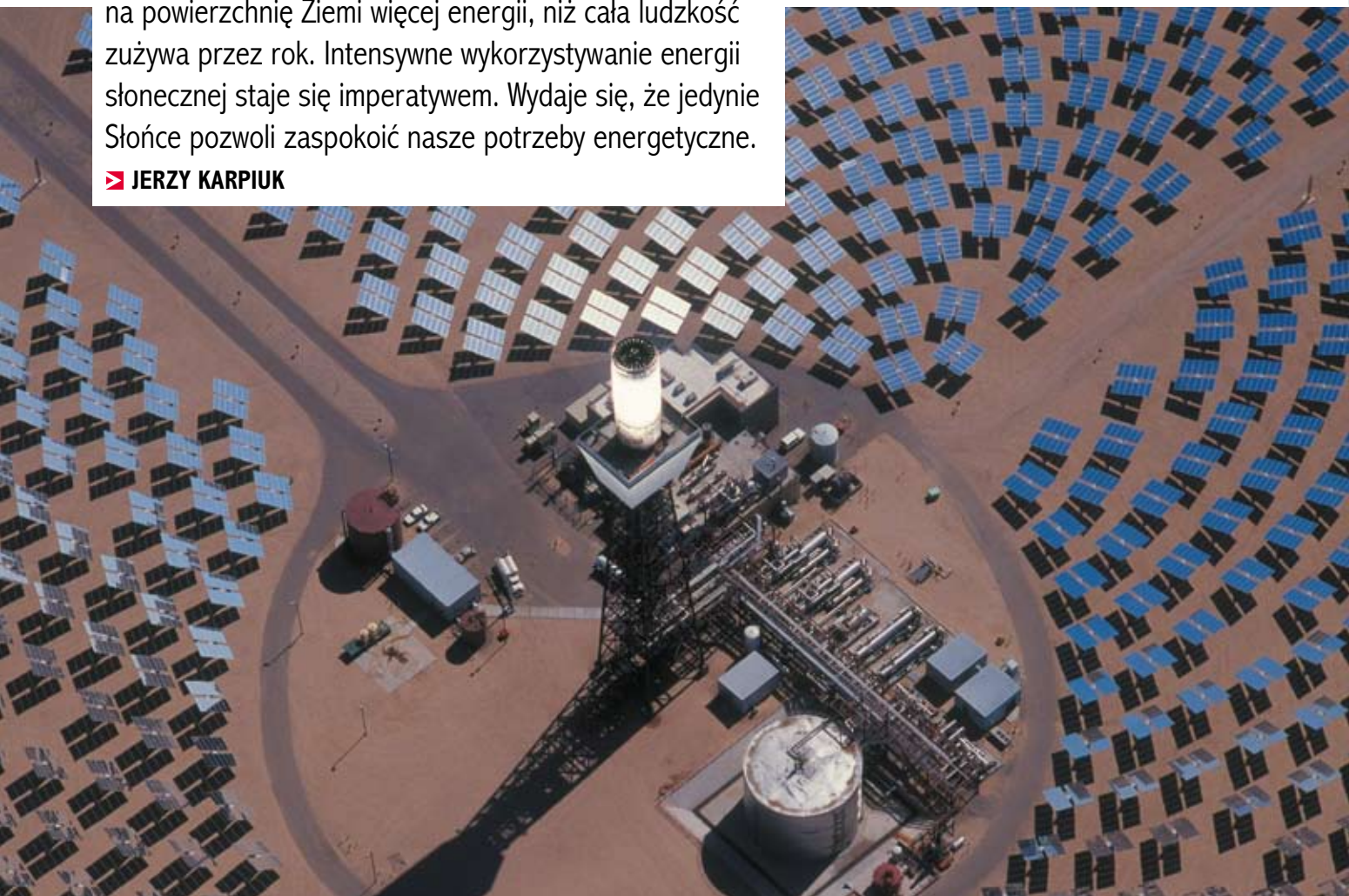


# ENERGIA ZE

Z najbliższej nam gwiazdy w ciągu godziny dociera na powierzchnię Ziemi więcej energii, niż cała ludzkość zużywa przez rok. Intensywne wykorzystywanie energii słonecznej staje się imperatywem. Wydaje się, że jedynie Słońce pozwoli zaspokoić nasze potrzeby energetyczne.

➤ JERZY KARPIUK



Musimy się przyzwyczaić do tego widoku. Energia ze Słońca jest nam potrzebna jak powietrze.

**E**KSPLOATOWANE na Ziemi paliwa kopalne, takie jak ropa naftowa czy węgiel kamienny lub brunatny, magazynują energię słoneczną. Spalając je, odzyskujemy – niestety, z niewielką wydajnością – energię fotonów, które miliony lat temu zainicjowały proces fotosyntezy w roślinach, z których paliwa te powstały. Również Słońcu zawdzięczamy większość źródeł energii odnawialnej: wiatr, biomasę czy energię wód. Spośród znaczących źródeł energii, jedynie jądrowa nie ma z nim bezpośredniego związku. Postulat wykorzystywania energii słonecznej nie oznacza zatem, że mamy używać jakiegoś nowego źródła energii – po prostu musimy nauczyć się korzystać z energii słonecznej zupełnie inaczej niż dotychczas.

Od początków naszej cywilizacji, czyli od czasów, gdy człowiek opanował ogień i nauczył się go stosować, zwyczajowo myślimy o energii w nieodłącznym związku ze spalaniem. Wręcz utożsamiamy ją z ciepłem wydzielającym się w procesach utleniania węgla i jego związków. Utrzymywaniu się tego schematu myślenia sprzyja nie tylko powszechna dostępność paliw bazujących na węglu i łatwość ich użycia, lecz także brak innych sensownych ekonomicznie rozwiązań. Wprawdzie od 120 lat korzystamy z elektryczności, ale jest ona tylko wygodną postacią energii, w którą (za pośrednictwem wody) przetwarzamy energię uzyskiwaną w dużej mierze ze spalania, a tylko w niewielkiej części z innych procesów. Zresztą, według danych ONZ,

Fot. Diomedes/istockphoto.com (2x)

# SŁOŃCA

aż 1,5–2 mld ludzi nie ma dostępu do elektryczności. Zatem życie (i przeżycie) blisko 1/3 mieszkańców naszego globu zależy od tego, czy uda się im zebrać drewno, nawóz czy innego rodzaju biomasę.

Ponad 80% energii produkowanej na świecie pochodzi ze spalania paliw kopalnych. Ponadto wiele prognoz gospodarczych i politycznych na najbliższe dziesięciolecie zakłada, że paliwa kopalne będą nadal nie tylko motorem rozwoju państw dysponujących ich zasobami, ale wręcz zadecydują o strategicznej pozycji tych krajów. Bezpieczeństwo energetyczne staje się niezwykle popularnym hasłem, a zapewnienie dostaw surowców energetycznych awansowało do rangi najwyższego priorytetu polityki. Dyskusje poświęcone energetyce dotyczą głównie tradycyjnych surowców kopalnych i dominuje w nich myślenie w kategoriach scenariuszy opartych na „węglowym” paradygmacie energetycznym. Choć wśród paliw przyszłości wymienia się inne źródła energii, to z powodu ich niewielkiego udziału w obecnym światowym zużyciu energii zwykły człowiek wciąż traktuje je z niedowierzaniem jako „paliwa przyszłości”.

Bo czy nie jest pouczające rozczarowanie związane z rozbudzonymi kilkadziesiąt lat temu i wciąż niespełnionymi nadziejami na energetykę termojądrową? Pomimo ogromnych nakładów na badania i niewątpliwych osiągnięć w ciągu ostatnich kilkunastu lat coraz więcej osób uważa, że naśladowanie w warunkach ziemskich procesów zachodzących we wnętrzu Słońca nie przyniesie przełomu i nie zaspokoi potrzeb energetycznych ludzkości, przynajmniej w dającym się przewidzieć czasie. Niepowodzenia w tej dziedzinie nie mogą jednak zniechęcać do poszukiwań innych źródeł energii, bo są one po prostu konieczne.

Nasza cywilizacja nieuchronnie zbliża się do momentu, w którym poziom zużycia surowców kopalnych i zapotrzebowania na nie (zwłaszcza na ropę naftową) zrówna się z poziomem maksymalnego ich wydobycia, po czym wydobycie zacznie spadać wskutek wyczerpywania się dostępnych złóż. Poza tym zmiany klimatu na Ziemi wywołane w istotnej części emisją gazów pochodzących ze spalania, zaczynają zagrażać ekosystemom i równowadze w przyrodzie. Już tylko te dwa czynniki każą intensywnie myśleć o nowych źródłach energii.

Popyt na nią będzie rósł i nie należy się łudzić, że energooszczędne technologie wpłyną na spadek zapotrzebowania. Jak zauważył już w 1865 roku angielski ekonomista i logik W. Jevons, bardziej ekonomiczne korzystanie z energii prowadzi do zwiększonego

jej zużycia. Tak było kiedyś i tak będzie w przyszłości. Ludzkość staje przed wyzwaniem na niespotykaną dotychczas skalę, jest bowiem pewne, że warunkiem dalszego postępu i rozwoju naszej cywilizacji jest znalezienie, przyswojenie i upowszechnienie nowych źródeł energii, a nie spalanie paliw węglowych. Czy wodór w połączeniu ze Słońcem stanie się kluczem do czystej energii przyszłości? Coraz więcej specjalistów jest przekonanych, że powinniśmy pytać nie „czy?”, ale „jak?” i „kiedy?”.



## Energia 2050: ile i skąd?

Prognozy ONZ przewidują, że w roku 2050 liczba mieszkańców Ziemi wzrośnie z obecnych 6,8 mld do 9–9,5 mld i wzrost ten nastąpi przede wszystkim w krajach rozwijających się. Ogólnoświatowa poprawa standardu życia coraz większej części populacji naszego globu powoduje ogromny wzrost zapotrzebowania na energię. Jest to naturalną konsekwencją wzrostu gospodarczego i głównie obejmie Azję. Trudno sobie bowiem wyobrazić, że np. odnotowujący ostatnio dwucyfrowy wzrost PKB Chińczycy czy mieszkańcy Indii (które zresztą około 2030 roku wyprzedzą Chiny i staną się najludniejszym krajem świata) nie będą chcieli nacieszyć się tymi dobrodziejstwami cywilizacji, które od lat ułatwiają życie mieszkańcom bogatej Północy i Zachodu.

Obecny światowy pobór mocy elektrycznej i grzewczej szacuje się na ok. 15 terawatów (1 TW = 10<sup>12</sup> W), czyli może go pokryć 15 tys. dużych elektrowni o mocy 1000 MW każda. Wprawdzie prognozy energetyczne silnie zależą od zakładanych wskaźników rozwoju gospodarczego, ale już przy umiarkowanym założeniu średniego długookresowego wskaźnika wzrostu gospodarczego 1,6% i kompensacji wzrostu zapotrzebowania na energię przez efektywniejsze wykorzystywanie energii na poziomie 1% rocznie w przeliczeniu na jednostkę PKB można zachowawczo prognozować, że w roku 2050 świat będzie potrzebował 28 TW mocy. Bardziej realistyczne prognozy mówią nawet o 35 TW. Gdyby zaś wszyscy mieszkańcy Ziemi chcieli za 39 lat cieszyć się amerykańskim stylem życia (płacąc za to amerykańskim zużyciem energii), wówczas globalny popyt na moc przekroczyłby astronomiczny poziom 100 TW, czyli niemal dwukrotnie więcej, niż według ➤

Szacuje się, że każdego dnia Słońce zalewa Ziemię energią o mocy 170 000 TW. Jak gigantyczna to wartość łatwo sobie uświadomić, porównując tę liczbę z obecnym całkowitym zużyciem mocy przez naszą cywilizację: zaledwie ok. 15 TW. Mimo ogromnego potencjału udział Słońca w ogólnej produkcji energii pozostaje wyjątkowo niski. W USA zaledwie co setny wat uzyskany ze źródeł odnawialnych pochodzi bezpośrednio od najbliższej nam gwiazdy.

Wzrost średniej temperatury na świecie zaledwie o 1–2 stopnie może spowodować zagładę raf koralowych.

realistycznych prognoz ludzkość będzie potrzebować pod koniec naszego stulecia.

Odkładając fantazje na bok, powinniśmy jednak stwierdzić, że w ciągu najbliższych 39 lat będziemy musieli zwiększyć produkcję mocy o 13–20 TW i wytwarzać – globalnie – ponad dwukrotnie więcej energii niż teraz. Rodzi to dwa podstawowe pytania: po pierwsze, skąd ma pochodzić ta dodatkowa energia, a po dru-

struktury źródeł energii za 39 lat spowoduje wzrost stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze powyżej 750 ppm i poważne następstwa ekologiczne. Jeśli w 2050 roku stężenie CO<sub>2</sub> ma być nie wyższe niż 550 ppm, to 20 TW zużywanej wówczas mocy (czyli praktycznie cały przyrost zużycia w stosunku do obecnego poziomu) musi pochodzić ze źródeł niewęglowych. To znacznie więcej, niż wynosi obecnie całkowite zużycie energii na świecie.

Porównanie dobitnie uświadamia, jak wielkiego skoku naukowego i technicznego powinna dokonać nasza cywilizacja. Jest on konieczny, bo obecnie dostępne i opanowane źródła energii nieoparte na węglu nie umożliwią takiego przyrostu produkcji energii. Jeśli bowiem założymy, że cały przyrost zapotrzebowania miała by pokryć energetyka jądrowa, to do 2050 roku trzeba by wybudować na świecie 20 tys. reaktorów o mocy 1000 MW każdy, co oznacza, że – poczynając od dziś – każdego dnia tygodnia pracę musiałby rozpoczynać nowy wielki reaktor, a w soboty i niedziele – po dwa. Nawet gdyby było to technicznie możliwe, nie wydaje się, szczególnie po ostatnich wypadkach w Fukushima, akceptowalne społecznie.

Przyszłych potrzeb energetycznych nie pokrywają też źródła energii odnawialnej, takie jak biomasa, wiatr czy energia hydroelektryczna. Według danych amerykańskiego Departamentu Energii biomasa może dostarczyć 5–7 TW mocy przy założeniu, że do jej wyprodukowania użyje się całej powierzchni rolnej, a wszystkie rośliny zbierze wyłącznie w celu uzyskania energii. Ponadto biomasa jest paliwem bardzo nieefektywnym, ponieważ w procesie fotosyntezy (w optymalnych warunkach wzrostu) rośliny mogą zmagazynować mniej niż 1% całej energii padającego na nie promieniowania słonecznego.

Z wiatru daje się globalnie uzyskać 2 TW, ale pod warunkiem zabudowania elektrowniami wiatrowymi całej powierzchni lądów, na których prędkość wiatru spełnia minimalne wymagania dla generowania energii elektrycznej. Z energii hydroelektrycznej technicznie można by uzyskać 1,6 TW, ale opłacalne ekonomicznie jest tylko 0,9 TW. Do tego dodajmy energię geotermiczną (12 TW globalnie, tylko niewielka część możliwa do wykorzystania) i trudną do wykorzystania energię pływów morskich (2 TW). Choć te wielkości zostały wyliczone bez założenia postępu naukowego (np. ewentualnych osiągnięć inżynierii

genetycznej umożliwiających wytwarzanie większej ilości biomasy) ani nie uwzględniono w nich też wykorzystania wiatru nad obszarami morskimi, to liczby te obrazują skalę problemu, z którym zetkniemy się jeszcze w obecnym półwieczu. Energia jądrowa i inne „alternatywne” źródła energii nie pozwolą zaspokoić prognozowanych potrzeb. Nasz apetyt na energię jest po prostu zbyt duży.

## Słońce – źródło z perspektywą

Skąd zatem wziąć brakującą energię? Jedyne źródłem, które w roku 2050 umożliwi pozyskiwanie 10–20 TW mocy z energii „bezwęglowej”, jest Słońce. Obdarza ono Ziemię energią o mocy 1,7 • 10<sup>5</sup> TW, z czego około 600 TW można wykorzystać praktycznie. Przy założeniu wydajności rzędu 10%, konwertery energii słonecznej mogłyby dostarczyć nawet 60 TW mocy (zależnie od powierzchni, którą można przeznaczyć do jej pozyskiwania).

Aby sobie wyobrazić, co znaczy ta liczba, odnotujmy, że procesy fotosyntezy zasilające całą ziemską biosferę dostarczają 90 TW mocy. Dla wytworzenia 20 TW mocy, konwerterami energii słonecznej o 10-procentowej wydajności trzeba byłoby pokryć 0,54% powierzchni lądów, czyli około 800 tys. km<sup>2</sup>. Czy to dużo? Z jednej strony tak, bo jest to powierzchnia 2,5 razy większa od terytorium Polski, ale z drugiej – ledwie 8,8% powierzchni USA. Warto też sobie uświadomić, że po pokryciu ogniwami słonecznymi dachów wszystkich domów jednorodzinnych tylko w USA uzyskano by 0,25 TW.

Skala wyzwań technicznych jest podobna jak w przypadku analizowanej wcześniej energetyki jądrowej: w celu zaspokojenia prognozowanego przyrostu popytu na energię do roku 2050 trzeba każdego dnia instalować ponad 1 GW mocy. Postęp w tej dziedzinie jest jednak szybki: w rekordowym 2010 roku zainstalowano na świecie ogniwa fotowoltaiczne o mocy niemal 13 GW i przewiduje się, że moc tych ogniw w roku 2015 wyniesie 180 GW, a w 2020 – 350 GW.

Przykład przemysłu samochodowego przekonuje jednak, że osiągnięcie poziomu umożliwiającego instalowanie 1 GW dziennie jest technicznie możliwe. W USA produkuje się rocznie ponad 15 mln samochodów, każdy z silnikiem średnio o mocy przynajmniej 50 kW, co w praktyce oznacza instalowanie w ciągu roku nowych źródeł energii o mocy 750 GW. Jest zatem całkowicie wyobrażalne, że światowe zapotrzebowanie na energię z czystych źródeł niewęglowych może zaspokoić branża o wielkości odpowiadającej połowie amerykańskiego przemysłu motoryzacyjnego.

Utrzymujące się jeszcze (nie tylko w Polsce) przekonanie, że fotowoltaika to technologia niszowa, wydaje się obecnie dowodem niezrozumienia potrzeb energetycznych przyszłości, a przede wszystkim nieświadomości ogromnego potencjału tej dziedziny, jako źródła bezpiecznej energii odnawialnej. Od opracowania pierwszych nowoczesnych ogniw słonecznych w 1954 roku do początku lat 70. XX wieku prace nad ogniwami fotowoltaicznymi były ukierunkowane głównie na technikę kosmiczną. Kryzys energetyczny z 1973 roku dał silny impuls do podjęcia prac badawczo-rozwojowych nad

ogniwami do zastosowań naziemnych i w efekcie światowa produkcja ogniw słonecznych w latach 1980–2004 wzrosła ponad 100-krotnie (z 10 MW do 1200 MW). Wartość rynku energii elektrycznej generowanej przez ogniwa słoneczne wyniosła w 2004 roku 7,5 mld dolarów i rośnie w tempie przekraczającym 40% rocznie.

Chociaż znakomitą większość wyprodukowanych dotychczas (i produkowanych obecnie) ogniw słonecznych stanowią urządzenia półprzewodnikowe, to wydaje się, że przyszłość będzie należała do materiałów hybrydowych (półprzewodnikowo-organicznych) i organicznych. Pomaga w tym chemia, która od dość dawna potrafi realizować zamówienia na materiały funkcjonalne – złożone z cząsteczek zaprojektowanych i przeznaczonych do pełnienia określonych funkcji. Na istotne znaczenie materiałów organicznych wskazują intensywne prace nad zjawiskiem sztucznej fotosyntezy czy najróżniejszymi bionaśladowczymi (bioinspired) układami do fotoindukowanej separacji ładunku elektrycznego. Budzące wciąż jeszcze duże nadzieje, hybrydowe ogniwa Grätzela także wykorzystują fotoindukowane przeniesienie elektronu z cząsteczki barwnika organicznego do pasma przewodnictwa półprzewodnika.

## Przemiana z wody w wodę

Wyzwania energetyczne spowodują, że znaczną część tego rynku będzie stanowić fotowoltaika organiczna. Funkcjonalne układy organiczne mają istotną przewagę nad materiałami nieorganicznymi: umożliwiają przechowywanie przejętej energii promieniowania w wiązaniach chemicznych. Jest to bardzo ważne, ponieważ ponad połowę zebranej energii słonecznej trzeba

W dzień Słońce, w nocy światło – bilans wychodzi na zero.

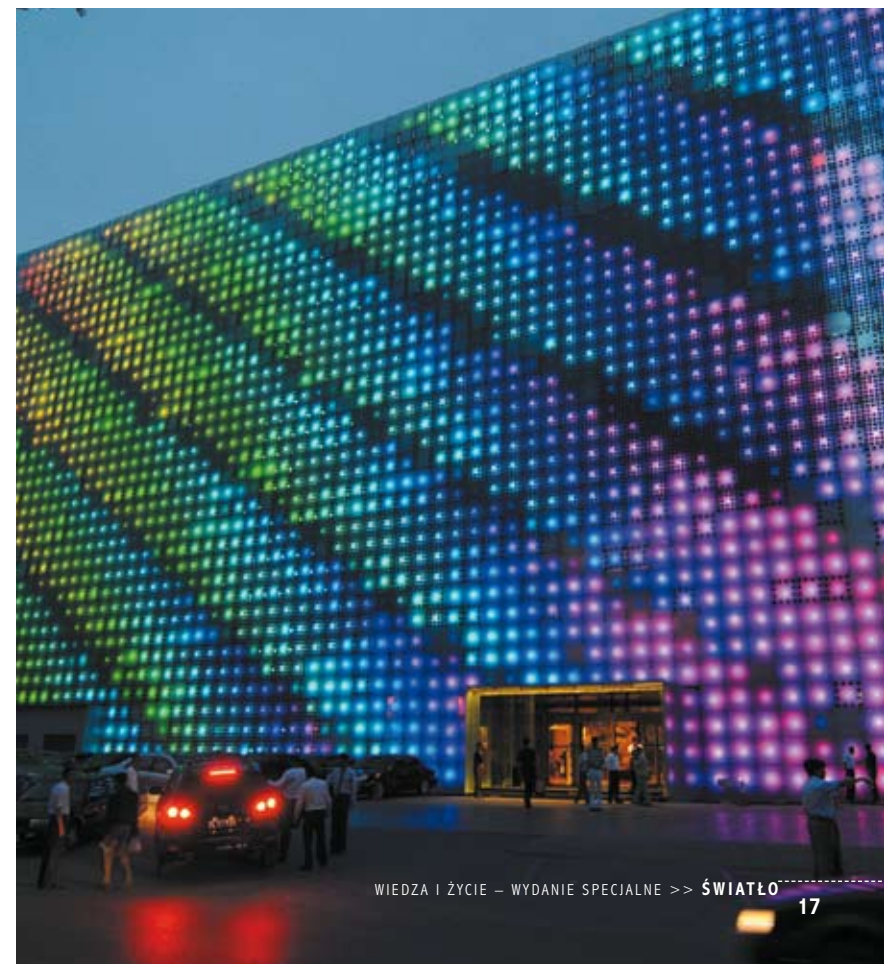


Zanieczyszczenia i spaliny, nieodłącznie związane ze stosowaniem paliw kopalnych, przyczyniają się do powstawania zaburzeń klimatycznych.

gie, jak pogodzić ten ogromny wzrost ilości zużywanej przez ludzkość energii z wymaganiami ekologii i zrównoważonego rozwoju?

Jeśli wzrost zapotrzebowania na energię ma nastąpić przy coraz mniejszej emisji dwutlenku węgla i innych gazów odpowiedzialnych za efekt cieplarniany, to radykalnie musi zmienić się struktura źródeł energii, przede wszystkim na rzecz tych, które nie korzystają z węgla. Obecne stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze wynosi około 380 ppm (części na milion) i jest znacznie wyższe niż w epoce sprzed rewolucji przemysłowej w końcu XVIII wieku (275 ppm).

Większość klimatologów uważa, że stężenie 550 ppm CO<sub>2</sub> (dwa razy większe niż w roku 1700) doprowadzi do wzrostu średniej temperatury na świecie o 1–2°C. Nie będzie on jeszcze katastrofą i ludzie się do niego przystosują, ale spowoduje istotne zmiany w przyrodzie, np. zagładę niemal wszystkich raf koralowych. Podążanie ścieżką dotychczasowego rozwoju z zachowaniem obecnej



Wiatr, często postrzegany jako alternatywne źródło energii, może dostarczyć w najlepszym przypadku do 2 TW mocy. Prognozowany wzrost zapotrzebowania w najbliższych dekadach jest o rząd wielkości wyższy.




➤ będzie w jakiejś postaci zmagazynować. Jednym z najbardziej logicznych alternatywnych rozwiązań wydaje się wytwarzanie wodoru w reakcji fotokatalitycznego rozkładu wody, a następnie stosowanie go jako paliwa np. w wodorowych ogniwach paliwowych lub w reakcji bezpośredniego spalania. Wodór z łatwością zastąpi paliwa węglowe w istniejących systemach energetycznych, można będzie go również używać do wytwarzania energii elektrycznej w czasie, gdy światło słoneczne jest niedostępne.

W reakcji spalania wodoru powstaje woda, którą z kolei można poddać rozkładowi z użyciem kolejnych kwantów światła. Zrealizowanie takiego cyklu procesów zapewniłoby ludzkości praktycznie niewyczerpane źródło czystej energii w cyklu przemiany „wody w wodę” z pobieraniem energii ze Słońca i oddawaniem jej w użytecznej postaci. Zjawisko rozkładu cząsteczek wody na wodór i tlen z wykorzystaniem energii świetlnej i katalizatora zostało odkryte przez Japończyków K. Honde i A. Fujishimę w 1971 roku. Z uwagi na dużą energię wiązania tlen-wodór, pierwotnie rozkład wody przeprowadzano z użyciem kwantów światła o energii przypadającej na nadfiolet. Niedawno udało się opracować katalizatory przesuwające próg energetyczny tej reakcji do obszaru widzialnego (długości fali światła powyżej 400 nm).

Widmo światła słonecznego przypada w dużej części na obszar widzialny (400–800 nm) i dopiero skuteczne wykorzystanie tego zakresu spektralnego umożliwi wydajne

naśladowanie procesu fotosyntezy i efektywną fotokatalizę rozkładu wody z udziałem światła. Będzie to wymagać opracowania nowych katalizatorów pozwalających na taką reorganizację wiązań w cząsteczkach wody, aby można było z wykorzystaniem światła widzialnego przekształcać dwie cząsteczki  $H_2O$  w dwie cząsteczki  $H_2$  i jedną cząsteczkę  $O_2$ .

Chemicy muszą poznać mechanizmy reakcji wieloelektronowych, połączonych z transferem protonów, a także zrozumieć molekularne podstawy oraz opracować ilościowe i predyktywne modele takich procesów. Ponadto chemia, dająca sobie dotychczas doskonałe radę z katalitycznymi przegrupowaniami w cząsteczkach reaktywnych, będzie musiała odkryć lub opracować wydajne reakcje umożliwiające tworzenie i zrywanie wiązań w cząsteczkach trwałych i ubogich w energię (takich jak woda). Opracowano już katalizatory umożliwiające rozkład wody tą metodą w skali laboratoryjnej. Prace nad ich udoskonaleniem i przekształceniem do postaci pozwalającej na powszechne zastosowanie oraz badania ich reaktywności z pewnością przyczynią się do lepszego poznania zasad i warunków potrzebnych do przeprowadzania wydajnej sztucznej fotosyntezy.

Bitwa o przyszłe źródła energii nie będzie przebiegać w salonach politycznych i w zaciszu gabinetów strategów, ale w laboratoriach chemicznych badających molekularne mechanizmy transferu i magazynowania energii i ładunku. Prace w tej dziedzinie wymagają niewielkich nakładów. Zadaniem polityków jest więc stworzenie naukowcom warunków umożliwiających nowe odkrycia i postęp w tej dziedzinie. Amerykanie mówią tu o skali działania przypominającej takie programy jak Project Manhattan czy Apollo. Rozwój nowych technologii to szansa dla krajów, które będą nad nimi pracowały, a także dla młodych następców starych mistrzów. Sprostanie temu wyzwaniu będzie mieć rangę historycznego przełomu i niewątpliwie da potężny impuls do dalszego rozwoju naszej cywilizacji. 

➤ DR HAB. INŻ. JERZY KARPIUK, asystent w Instytucie Chemii Fizycznej PAN w Warszawie

Fot. iStockphoto.com (2)