

Apetyt na energię

Na powierzchnię Ziemi w ciągu godziny dociera więcej energii ze Słońca, niż cała ludzkość zużywa przez rok. Intensywne wykorzystywanie energii słonecznej staje się nie przywilejem, ale imperatywem. Wydaje się bowiem, że jedynie Słońce pozwoli zaspokoić potrzeby energetyczne przyszłości.

> JERZY KARPIUK

WYKORZYSTYWANE 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. Spalając węgiel w piecu, korzystamy zatem ze zmagazynowanej energii słonecznej. Podobnie, Słońce daje początek większości źródeł energii odnawialnej: wiatrowi, biomase czy energii wód. Spośród znaczących źródeł energii, jedynie jądrowa nie ma bezpośredniego związku ze Słońcem. 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.

Koniec spalania związków węgla

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 energię 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 sensownych ekonomicznie alternatywnych 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.

Należy przy tym zauważyć, że według danych ONZ 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 biomasę innego rodzaju w celu zaspokojenia podstawowych potrzeb związanych z ogrzewaniem i gotowaniem jedzenia. Nawet dziś, pół wieku po uruchomieniu pierwszej elektrowni jądrowej, ponad 80% energii produkowanej na świecie pochodzi ze spalania paliw kopalnych. Ponadto, wiele prognoz gospodarczych i politycznych na najbliższe dziesięciolecia 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 nie tylko krajów rozwiniętych. Dyskusje poświęcone energetyce zawiązują się do problematyki tradycyjnych surowców kopalnych i dominuje w nich myślenie w kategoriach scenariuszy opartych na „węglowym” paradygmacie energetycznym. Nawet jeśli 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 rozbudzonymi kilkadziesiąt lat temu i wciąż niespełnionymi nadziejami na energetykę termojądrową? Pomimo ogromnych nakładów na badania nad syntezą termojądrową i niewątpliwymi osiągnięć w tej dziedzinie 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 horyzoncie czasowym. 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. Z drugiej strony, zmiany klimatu na Ziemi wywołane w istotnej części emisją gazów pochodzących ze spalania, zaczynają na naszych oczach zagrażać ekosystemom i równowadze w przyrodzie. Już tylko te dwa czynniki każą intensywnie myśleć o nowych źródłach energii dla przyszłych pokoleń.

Popyt na energię 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

Przyszłość energetyki to Słońce. Na zdjęciu fragment systemu zasilanego energią słoneczną, skonstruowanego w Sandia National Laboratories. Prototypowa instalacja generuje moc 10 kW.

Ludzkość zbliża się do punktu, w którym dotychczasowe źródła energii nie będą w stanie zaspokoić rosnącego zapotrzebowania. Załamanie najprawdopodobniej nastąpi jeszcze w tym półwieczu.

$J = J - J (eqV/mkBT - 1)$
 $(eqV/mkBT - 1)$

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

Energia 2050: ile i skąd?

Prognozy ONZ przewidują, że w roku 2050 liczba mieszkańców Ziemi wzrośnie z obecnych 6,5 mld do 9–9,5 mld i wzrost ten będzie miał miejsce przede wszystkim w krajach rozwijających się. Ogólnoświatowa poprawa warunków i rosnący standard życia coraz większej części populacji naszego globu spowodują ogromny wzrost zapotrzebowania na energię w pierwszym półwieczu XXI stulecia. Będzie to naturalną konsekwencją wzrostu gospodarczego i obejmie głównie Azję i Afrykę. Trudno sobie bowiem wyobrazić, że na przykład odnotowujący ostatnio dwucyfrowy wzrost PKB Chińczycy czy mieszkańcy Indii (które zresztą około 2030 roku wyprzedzą Chiny i staną się najludniejszym krajem świata) lub Afryki nie będą chcieli nacieszyć się tymi dobrodziejstwami cywilizacji, które od lat ułatwiają życie i radują mieszkańców bogatej Północy i Zachodu.

Obecny światowy pobór mocy elektrycznej i grzewczej szacuje się na 13,5 terawatów (1 TW = 10¹²W), czyli może go pokryć 13 500 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 potrzebować 28 TW mocy. Bardziej realistyczne prognozy mówią nawet o 35 TW. Gdyby zaś wszyscy mieszkańcy Ziemi chcieli za 43 lata 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 realistycznych prognoz ludzkość będzie potrzebować pod koniec naszego stulecia.

Odkładając fantazje na bok, powinniśmy jednak stwierdzić, że w ciągu najbliższych 43 lat będziemy musieli zwiększyć produkcję mocy o 15–22 TW i wytworzyć – globalnie – 2,5-krotnie więcej energii niż teraz. Rodzi to dwa podstawowe pytania: po pierwsze, skąd ma pochodzić ta dodatkowa energia, a po drugie, jak pogodzić ten ogromny wzrost ilości zużywanej przez ludzkość energii z wymaganiami ekologii i zrównoważonego rozwoju?

Czy chcemy zniszczyć rafy koralowe?

Jeśli wzrost zapotrzebowania na energię ma następować 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 CO₂ 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).

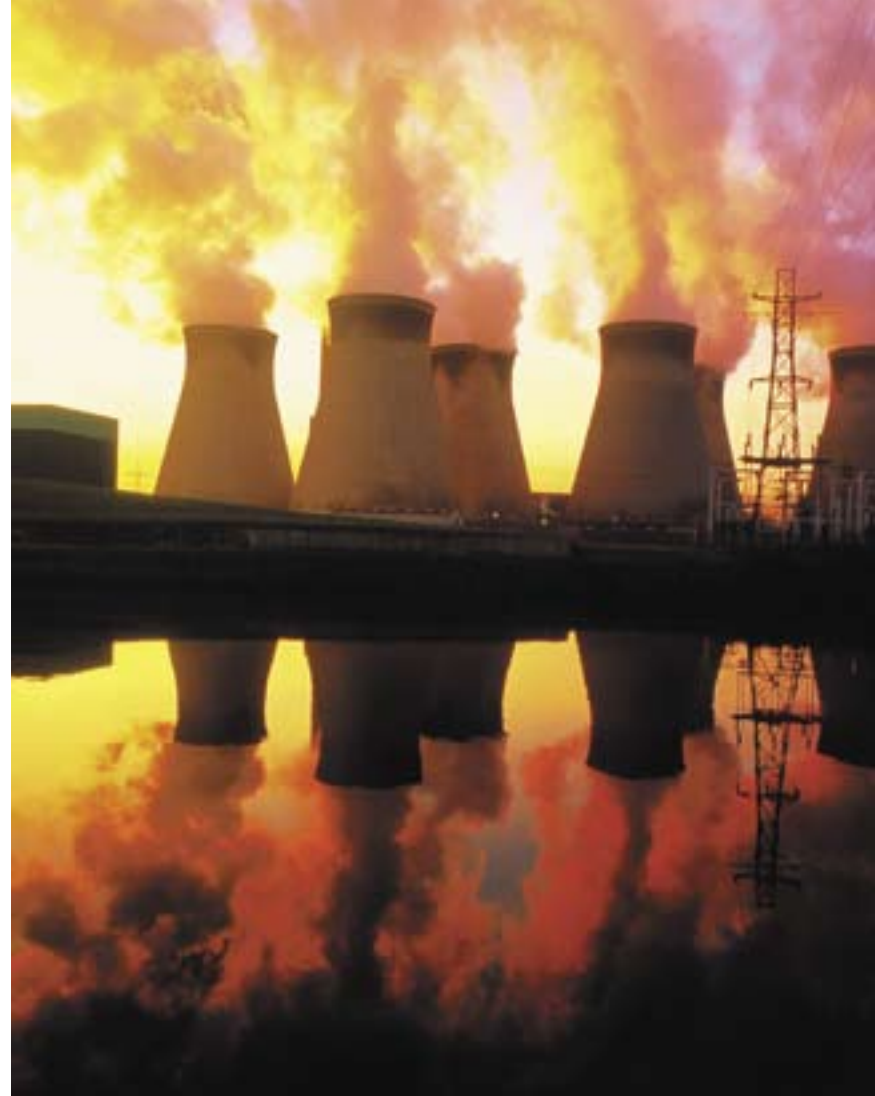
Większość klimatologów uważa, że stężenie 550 ppm CO₂ (dwa razy większe niż w roku 1700) doprowadzi do wzrostu średniej temperatury na świecie o 1–2 °C.

Taki wzrost temperatury nie będzie jeszcze katastrofą i ludzie się do niego przystosują, ale spowoduje on istotne zmiany w przyrodzie, na przykład zagładę niemal wszystkich raf koralowych. Podążanie ścieżką dotychczasowego rozwoju z zachowaniem obecnej struktury źródeł energii spowoduje wzrost stężenia CO₂ w atmosferze za 43 lata powyżej 750 ppm i poważne następstwa ekologiczne. Jeśli chcemy, aby w 2050 roku stężenie CO₂ było 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.

Powyższe porównanie dobitnie uświadamia potęgę skoku naukowego i technicznego, jakiego musi 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 miałaby 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. Być może byłoby to technicznie możliwe, ale czy pozwolą na to względy ekonomiczne i społeczne?

Według danych World Nuclear Association (WNA), w listopadzie 2006 roku w ramach światowej sieci energetycznej działały zaledwie 442 reaktory jądrowe o łącznej mocy 0,37 TW, a 28 reaktorów (0,02 TW) było w budowie. W ciągu ostatnich sześciu lat oddano do eksploatacji elektrownie jądrowe o mocy 0,02 TW, co odpowiada zaledwie 1/1000 prognozowanego przyrostu. Liczba wszystkich planowanych i proponowanych do budowy reaktorów nie przekracza 200 o łącznej mocy 0,2 TW, a to pozwala przypuszczać, że uran nie będzie paliwem, które rozwiąże problemy przyszłości. Przykład Polski, której według WNA nie ma jeszcze nawet wśród krajów proponujących budowę reaktorów dla energetyki, pozwala na trzeźwą ocenę perspektyw w tej dziedzinie. Do tego dochodzi narastający problem zagospodarowywania wypalonego paliwa i odpadów radioaktywnych generowanych przez energetykę jądrową, co nie tylko podraża energię uzyskiwaną z tego źródła, ale powoduje także, że zaciągamy dług u przyszłych pokoleń, które będą musiały dbać o pozostawione przez nas groźne śmieci.

Należy sobie także uświadomić, że przyszłych potrzeb energetycznych nie pokryją 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. Realistycznie – znacznie mniej, a przy tym pozyskiwanie energii z biomasy oznacza emisję znacznych ilości CO₂ do atmosfery. 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.



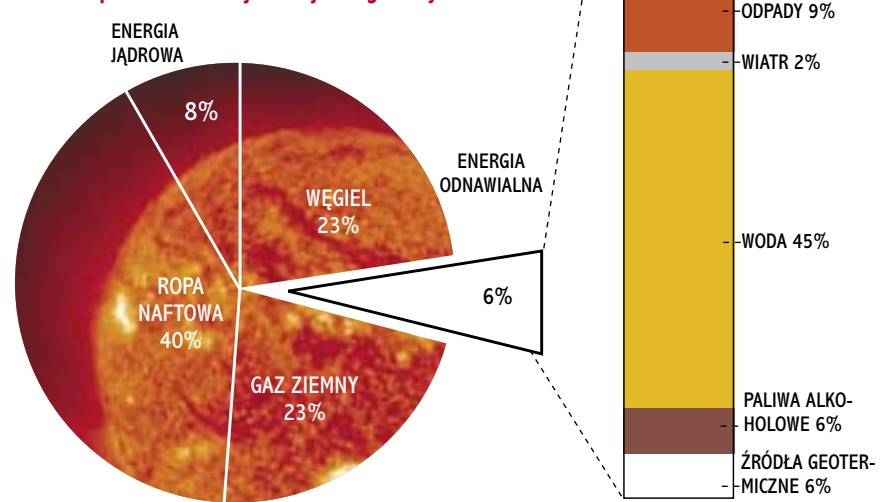
Z wiatru daje się globalnie uzyskać 2 TW, ale pod warunkiem zabudowania elektrowniami wiatrowymi całej powierzchni lądów, na których szybkość wiatru spełnia minimalne wymagania dla generowania energii elektrycznej. Z energii hydroelektrycznej technicznie można by uzyskać 1,6 TW, ale opłacalne ekonomicznie 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). Chociaż podane tutaj wielkości zostały uzyskane bez zakładania postępu technicznego (np. nie uwzględniamy, że ewentualne osiągnięcia inżynierii genetycznej umożliwią wytworzenie większej ilości biomasy, ani nie bierzemy pod uwagę wykorzystania wiatru nad obszarami morskimi itp.), to liczby te obrazują skalę problemu, z którym zetkniemy się jeszcze w obecnym półwieczu.

Wniosek jest jasny: energia jądrowa i wymienione wyżej „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? Jedynym źródłem, które w roku 2050 umożliwi pozyskiwanie 10–20 TW mocy z energii „bezwęglowej” jest Słońce. Obdarza ono Ziemię energią o mocy 1,7 · 10⁵ TW, z czego

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 13,5 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.





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.

około 600 TW można wykorzystać praktycznie. Przy założeniu wydajności rzędu 10%, konwertery energii słonecznej mogłyby dostarczyć nawet 60 TW mocy (zależnie od powierzchni, jaką można przeznaczyć do pozyskiwania tej energii).

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. km². 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. Biorąc pod uwagę, że obecna światowa roczna produkcja ogniw fotowoltaicznych (lwią część produkcji przypada na Japonię) jest niewiele większa (1,7 GW), wymaga to wręcz eksponencjalnego wzrostu w tej branży.

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 30% 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 bionaśladowcami (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.

Jesteśmy u zarania epoki elektroniki organicznej. Przewiduje się, że wartość tego rynku wzrośnie z 650 mln dolarów w roku 2005 do 30 mld w 2015, a po kolejnych 10 latach osiągnie astronomiczny poziom 250 mld. Wyzwania energetyczne spowodują, że znaczną część tego rynku będzie stanowił fotowoltaika organiczna.

Przemiana z wody w wodę

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 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 na przykład 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. Hondę 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 umożliwiłoby 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 H₂O w dwie cząsteczki H₂ i jedną cząsteczkę O₂.

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, dającą sobie dotychczas doskonale 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 przeprowadzenia 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 niemałych nakładów, lecz pozwolą krajom, które środki takie zainwestują – także takim jak Polska – zająć czołową pozycję w wyścigu po energię dla naszych dzieci i wnuków.

Wyzwanie dla naukowców i... decydentów

Jeśli chcemy zaspokoić potrzeby energetyczne świata i uniknąć poważnych zmian klimatu na Ziemi, musimy wyzwolić się z paradygmatu ognia jako źródła energii i zastosować inne podejście. Zadaniem polityków jest 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 potrzebny impuls do dalszego rozwoju naszej cywilizacji.

DR INŻ. JERZY KARPIUK jest pracownikiem naukowym Instytutu Chemii Fizycznej PAN w Warszawie.

W USA samo pokrycie dachów domków jednorodzinnych pozwoliłoby wytworzyć 0,25 TW. Na zdjęciu: dach ośrodka Camp Ramah w Ojai (Kalifornia) generuje 90 kW mocy.

Jeśli chcemy zaspokoić prognozowane potrzeby ludzkości w 2050 roku, każdego dnia musimy zwiększyć produkowaną moc o ponad 1 GW.