

Tadeusz Pindór, Leszek Preisner

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

TECHNICZNE, ŚRODOWISKOWE I EKONOMICZNE ASPEKTY WYKORZYSTANIA ENERGII ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH¹

1. Wstęp

Znaczenie problematyki gospodarki odnawialnymi źródłami energii inspiruje do prowadzenia wszechstronnych, wielodyscyplinarnych badań. Napięcia w bilansie energii, na poziomie mega-, makro- i mikroekonomicznym, które pojawiły się na początku XXI stulecia, przybierając spektakularny wymiar w załamaniu zasilania energetycznego w Kalifornii, doprowadziły do kolejnego szoku cenowego na międzynarodowych rynkach ropy naftowej i gazu ziemnego, a obecnie przenoszą się na rynki innych pierwotnych nośników energii.

Dynamika zjawisk w globalnym sektorze paliw i energii wynika z synergii czynników o charakterze: technicznym, środowiskowym i ekonomicznym. Problemy te stają się zasadnicze również w odniesieniu do gospodarki narodowej Polski.

2. Udział źródeł odnawialnych w strukturze zużycia pierwotnych nośników energii

Strukturę zużycia pierwotnych nośników energii w świecie w 2005 r. przedstawiono w tab. 1. Analiza tych danych pozwala na stwierdzenie, że udział odnawialnych źródeł energii w globalnym zużyciu nośników pierwotnych jest niezwykle niski.

W odniesieniu do generowania energii elektrycznej, źródła odnawialne partycypują łącznie w wysokości 18,52%, a bez energii wodnej stanowią zaledwie 2,12% wszystkich źródeł energii, na co składa się głównie wykorzystanie energii

¹ Artykuł został opracowany w ramach badań statutowych nr 11/11.200.200.

pochozącej ze spalania biomasy – 0,88%, oraz energii generowanej przez wiatr – 0,55%, natomiast udział energii słonecznej wynosi 0,02%.

Jeszcze mniejszy jest udział odnawialnych źródeł energii w produkcji energii cieplnej – wynosi on 4,12%, z czego 2,22% przypada na spalanie biomasy, a 1,81% na energetyczne wykorzystanie odpadów. Udział każdego z takich źródeł, jak: energia wodna, słoneczna, wiatrowa i pływów, jest na poziomie trudno mierzalnym – poniżej 0,01%.

Tabela 1. Produkcja energii elektrycznej i ciepła na świecie w 2005 roku

Pierwotne źródło lub forma energii	Energia elektryczna		Energia cieplna	
	GWh	%	TJ	%
Węgiel	7 350 724	40,15	4 306 348	32,28
Ropa	1 200 518	6,56	929 428	6,97
Gaz	3 596 992	19,65	6 765 576	50,72
Energia jądrowa	2 767 940	15,12	20 534	0,15
Biomasa	161 349	0,88	296 467	2,22
Odpady	64 347	0,35	241 310	1,81
Energia wodna	2 993 892	16,35	–	0,00
Energia geotermalna	57 579	0,31	11 569	0,09
Energia słoneczna (fotowoltaika)	1 636	0,01	–	0,00
Energia słoneczna (cieplna)	1 107	0,01	139	0,00
Energia wiatrowa	101 259	0,55	0	0,00
Energia pływów	565	0,00	0	0,00
Inne źródła	8 815	0,05	767 829	5,76
Łącznie	18 306 720	100,00	13 339 200	100,00

Źródło: [21, s. 18].

Tabela 2. Produkcja i zużycie energii odnawialnej według źródeł wytwarzania w latach 1999-2006

Rok		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Produkcja energii ogółem		84 240	80 070	80 260	80 170	79 878	78 654	78 447	77 676
Zużycie energii ogółem		93 550	90 050	90 039	89 185	93 189	93 660	94 832	100 264
Produkcja energii odnawialnej	razem	3 754	3 801	4 076	4 139	4 157	4 315	4 263	5 027
	w tym								
	geotermalnej	2	3	3	6	7	8	11	13
	biomasy	3 541	3 587	3 830	3 901	3 929	4 062	3 898	4 588
	wiatrowej	0,33	0,46	1	5	11	12	12	22
wodnej	185	181	200	196	144	179	189	176	
Udział produkcji energii odnawialnej	w produkcji energii ogółem (%)	4,46	4,75	5,08	5,16	5,2	5,48	5,43	6,47
	w zużyciu energii ogółem (%)	4,01	4,22	4,53	4,64	4,46	4,61	4,5	5,01

1 toe = 10 Gcal = 41,868 GJ

Źródło: [17, s. 228].

Tabela 3. Produkcja energii odnawialnej według źródeł wytwarzania w latach 2005-2006

Rodzaj technologii wykorzystującej odnawialne źródła energii	2005			2006		
	liczba instalacji [szt.]	moc zainstalowana [MW]	Ilość energii [MWh]	liczba instalacji [szt.]	moc zainstalowana [MW]	ilość energii [MWh]
Razem	826,0	1307,5	3 760 301,0	886,0	1509,5	4 221 547,7
Elektrownie na biomasę	7,0	189,8	467 975,7	6,0	238,8	503 846,2
Elektrownie na biogaz	67,0	32,0	104 465,3	74,0	36,8	116 691,9
Elektrownie wiatrowe	64,0	83,3	135 291,6	104,0	152,6	257 037,4
Elektrownie wodne	672,0	1002,5	2 175 559,1	684,0	1081,4	2 029 635,6
Współspalanie	16,0	–	877 009,3	18,0	–	1 314 336,6

Źródło: [17, s. 228].

Analiza danych dotyczących gospodarki nośnikami energii w Polsce, zawartych w tab. 2 i 3, pozwala na wyprowadzenie takich wniosków, jak:

- udział źródeł odnawialnych w generowaniu energii ogółem jest bardzo mały, a istotny wzrost tego wskaźnika zaznaczył się dopiero w 2006 r.;
- w okresie 1999-2006 znacznie zmniejszył się udział źródeł odnawialnych w zużyciu energii, w stosunku do odpowiedniego parametru odniesionego do produkcji energii – w 1999 r. udział energii ze źródeł odnawialnych wykorzystanej do wygenerowanej wynosił 89,9%, a w 2006 r. – 77,4%, co oznacza, że dynamicznie wzrosła wielkość bezwzględna i wskaźnik strat energii wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych.

3. Warunki generowania oraz wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych

3.1. Energia słońca

Energia promieniowania słonecznego stanowi największe, praktycznie niewyczerpywalne źródło energii, którym dysponuje człowiek. Większość źródeł energii jest pochodną energii słonecznej, pobieranej teraz lub pobranej przed milionami lat, głównie w postaci energii fal elektromagnetycznych.

Wykorzystanie energii słonecznej przez człowieka można podzielić na trzy zasadnicze kierunki, a mianowicie:

- proces fotosyntezy – umożliwiający uprawę roślin,
- konwersję fototermiczną – w celu pozyskania energii cieplnej,
- efekt fotowoltaiczny – generowanie energii elektrycznej.

Największą średnią gęstością energii promieniowania słonecznego, docierającego do powierzchni Ziemi, cechują się strefy równikowe, jednak największa ilość energii słonecznej, padającej na 1 m² powierzchni Ziemi w ciągu roku, występuje w strefach klimatu umiarkowanego, co wynika z długości dnia.

W Polsce ilość promieniowania słonecznego, przy bezchmurnym niebie, może osiągnąć 1050 W/m^2 . W przypadku pełnego zachmurzenia, kiedy dociera jedynie promieniowanie rozproszone, wartość ta może spaść nawet dziesięciokrotnie i wynieść około $100\text{-}150 \text{ W/m}^2$ [19].

Tak jak w przypadku większości technologii umożliwiających wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, stosowanie systemów fotowoltaicznych wymaga dużych nakładów kapitałowych na realizację inwestycji, natomiast późniejsze koszty eksploatacji są bardzo niskie [5].

Nakłady inwestycyjne na zakup i montaż systemów fotowoltaicznych pozwalają na wyróżnienie następujących pozycji:

- zakupu modułów fotowoltaicznych,
- zakupu elementów systemu, takich jak: akumulator, falownik, kontroler oraz okablowanie,
- transportu i instalacji poszczególnych elementów,
- projektowania i zarządzania projektem.

Koszt modułów fotowoltaicznych determinuje cenę dużych systemów podłączonych do sieci, ale stanowi tylko $\frac{1}{3}$ część ceny zakupu małych, wolno stojących systemów możliwych do zastosowania w procesach elektryfikacji wsi. Efektywny koszt modułów może być obniżony dzięki ich wielofunkcyjnym zastosowaniom, np. wytwarzane są moduły zintegrowane z fasadami lub dachami budynków, a także innymi zastosowaniami architektonicznymi oraz środowiskowymi, w szczególności takimi, jak półprzezroczyste oszklenia lub bariery pochłaniające dźwięk przy autostradach i drogach szybkiego ruchu.

Według [18] udział wyżej wymienionych składowych w całkowitych nakładach na zakup i montaż systemu fotowoltaicznego o mocy 1 kW, pokrywającego dach, wynosi (w %):

- modułu fotowoltaicznego – 53,
- falownika – 22,
- urządzeń mocujących – 12,
- innych – 13.

Podstawowym celem badań i rozwoju fotowoltaiki jest uzyskanie energii elektrycznej w cenie porównywalnej z ceną energii pozyskiwanej z konwencjonalnych źródeł energii. Fotowoltaika jest technologią czystą, która pozwala na generowanie energii elektrycznej bez obciążeń funkcji i komponentów środowiska. Systemy fotowoltaiczne mogą odgrywać poważną rolę w dostarczaniu energii w trzech zasadniczych dziedzinach:

- 1) zasilaniu rejonów odległych od sieci elektroenergetycznych,
- 2) w zastosowaniach profesjonalnych,
- 3) jako systemy dołączone do sieci.

Według Białej księgi *Energia dla przyszłości: odnawialne źródła energii* fotowoltaika będzie najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną wykorzystania

odnawialnych źródeł energii. W raporcie Komisji Europejskiej przewidziano wytworzenie oraz instalację jednego miliona systemów fotowoltaicznych do 2010 r., z czego połowa ma być zainstalowana w państwach Unii Europejskiej.

3.2. Energia wiatru

Zasoby wiatru są niewyczerpywalne, jednak energia kinetyczna wiatru stanowi jedynie 1-2% całkowitej energii promieniowania słonecznego, docierającego do powierzchni Ziemi. Jest to moc 2700 TW. Potencjał energetyczny wiatrów wiejących nad powierzchnią lądów, po uwzględnieniu strat, wynosi około 40 TW.

W Polsce średnioroczna prędkość wiatru w pewnych regionach przekracza 5,5 m/s. Do obszarów o wyjątkowo korzystnych warunkach wietrznych należą północna część Polski, w szczególności obszary w bliskiej odległości od linii brzegu Morza Bałtyckiego, a także północno-wschodnia część Suwalszczyzny. Warunki te sprzyjają inwestycjom w zakresie budowy, a następnie eksploatacji elektrowni wiatrowych. W wymienionych rejonach, na poziomie 50 m nad powierzchnią gruntu, średnia roczna prędkość wiatru osiąga wartość 7 m/s [4; 14].

Instalacja i wykorzystywanie elektrowni wiatrowych powodują liczne negatywne skutki dla środowiska:

- zakłócanie piękna krajobrazu,
- emisję hałasu,
- promieniowanie elektromagnetyczne, powodujące zakłócenia fal radiowych, telewizyjnych, telekomunikacyjnych,
- zagrożenia dla ptaków i owadów.

Tereny pod lokalizację farm wiatrowych, ze względu na obowiązujące przepisy, powinny znajdować się w odległości co najmniej 500 m od najbliższych siedzib ludzkich. Czynna elektrownia wiatrowa emituje hałas pochodzący głównie od obracających się łopat wirnika i w mniejszym stopniu z generatora i przekładni.

Innym zagadnieniem wymagającym uwzględnienia w procedurze lokalizacji farm wiatrowych jest efekt stroboskopowy, wywoływany przez wirujące śmigła.

3.3. Energia geotermalna

Energia geotermalna jest energią wnętrza Ziemi, zgromadzoną w skałach i wodach podziemnych. Ciepło we wnętrzu Ziemi jest ciepłem pierwotnym, związanym z formowaniem się planety. Dodatkowe źródła ciepła to procesy naturalnego rozpadu takich pierwiastków promieniotwórczych, jak: uran, tor i potas, a także promieniowanie słoneczne.

Wyróżnia się dwa rodzaje zasobów energii geotermalnej:

1) hydrotermalne – odnoszące się do warstw mieszaniny wody i pary wodnej o wysokiej temperaturze,

2) petrotermalne – odnoszące się do energii cieplnej zgromadzonej w suchych i porowatych masywach skalnych.

Podstawowym obecnie sposobem pozyskiwania energii geotermalnej jest odbiór ciepła z wód geotermalnych lub ze skał za pośrednictwem krążącego medium, czyli wody.

Pojęcie *wody geotermalne* stosowane jest do wód podziemnych, udostępnionych otworami wiertniczymi lub wypływających ze źródeł naturalnych, których temperatura na wypływie jest równa 20 °C lub wyższa. Jest to granica umowna, przyjęta przez wielu badaczy, a także w obowiązującej ustawie Prawo geologiczne i górnicze.

Argumenty zwolenników [8; 16; 19] rozwoju wykorzystania ciepłownictwa geotermalnego w Polsce można przedstawić następująco:

- zasoby energii geotermalnej są znaczne;
- istnieją duże możliwości skojarzonego wykorzystania energii geotermalnej oraz energii gazu ziemnego;
- użytkowanie energii geotermalnej nie powoduje zanieczyszczenia atmosfery;
- możliwe jest wykorzystanie zlikwidowanych otworów poszukiwawczych za ropą i gazem ziemnym.

Jedynymi istotnymi, zidentyfikowanymi zagrożeniami środowiskowymi, stwarzanymi w procesach wykorzystania energii geotermalnej, są emisja szkodliwych gazów oraz znaczne zmineralizowanie wody geotermalnej. Niektóre wody geotermalne zawierają takie gazy, jak siarkowodór i dwutlenek węgla, a ponadto promieniotwórczy radon. Zagrożenie mineralizacją wód geotermalnych nie występuje w przypadku cyklu zamkniętego, gdy woda geotermalna, po oddaniu ciepła, jest ponownie zatłaczana w głąb Ziemi.

3.4. Biomasa

Unia Europejska uznaje za biomasę wszelką substancję organiczną pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego i wszelkie pochodne substancje uzyskane z transformacji surowców pochodzenia roślinnego i zwierzęcego.

Przyjmując za kryterium stan skupienia, biomasę można podzielić następująco:

- biomasa w formie stałej: drewno, słoma, makulatura;
- biomasa w formie ciekłej: biopaliwa;
- biomasa w formie gazowej: biogaz, gaz pirolityczny z gazyfikacji drewna, gaz z osadów ściekowych.

Oprócz tradycyjnych metod uzyskiwania energii z biomasy, poprzez jej spalanie w kotłach, znane są jeszcze inne technologie energetycznego wykorzystania tego odnawialnego źródła energii – niektóre z tych technik charakteryzują się bardzo wysoką efektywnością konwersji energii.

Do podstawowych technologii wykorzystania biomasy w elektroenergetyce zalicza się: pirolizę, zgazowanie oraz spalanie. Procesy pirolizy i zgazowania bioma-

sy zaliczane są do bardzo efektywnych sposobów zagospodarowania biomasy ze względu na możliwość uzyskania gazu, który można bezpośrednio wykorzystać w turbinach lub silnikach gazowych. Procesy te cechuje bardzo wysoka sprawność energetyczna [2; 6; 9; 13; 20; 22].

W podsumowaniu tej części opracowania, dotyczącej uwarunkowań generowania energii ze źródeł odnawialnych, w tab. 4 zamieszczono dane dotyczące kapitałochłonności inwestycji oraz jednostkowych kosztów generowania energii.

Tabela 4. Nakłady inwestycyjne i jednostkowe koszty generowania energii elektrycznej dla różnych technologii i pierwotnych nośników energii

Technologia	Nakłady inwestycyjne [USD/kW]	Jednostkowe koszty generowania energii [USD/kWh]
Energia biomasy	900-3 000	0,05-0,15
Energia wiatru	1 100-1 700	0,05-0,13
Systemy fotowoltaiczne (PV)	5 000-1 0000	0,25-1,25
Duże elektrownie wodne	1 000-3 500	0,02-0,08
Małe elektrownie wodne	1 200-3 000	0,04-0,1
Energia geotermalna	800-3 000	0,02-0,1
Energia pływów morskich	1 700-2 500	0,08-0,15
Elektrownie węglowe	1 100-1 400	0,021-0,05

Źródło: [19, s. 396].

Jednostkowe koszty generowania energii oznaczają koszty ewidencjonowane w elektrowniach i energetyce rozproszonej. Dane te nie zawierają kosztów zewnętrznych, w tym wielu pozycji kosztów środowiskowych. Wprowadzenie do rynku energii Unii Europejskiej takiego instrumentu zarządzania ochroną środowiska, jak zbywalne prawa emisji CO₂, spowoduje drastyczny wzrost kosztów energii wtórnej pochodzącej ze spalania paliw kopalnych [1; 3; 7; 12; 15].

4. Zakończenie

Badania przeprowadzone na podstawie prezentowanych w pracy danych statystycznych pozwalają na stwierdzenie, iż w skali globalnej udział źródeł odnawialnych w strukturze zużycia pierwotnych nośników energii jest niezwykle mały.

Szczególnie istotny problem gospodarki odnawialnymi źródłami energii w Polsce stanowi wzrost strat energii wtórnej, wygenerowanej z nośników odnawialnych, sygnalizowany przez zmniejszający się udział zużycia energii odnawialnej do wielkości jej wytworzenia.

Wolumen emisji oraz ceny jednostkowe emitowanego CO₂ znajdą się w najbliższych latach wśród najważniejszych czynników kształtujących relacje pomiędzy kosztami generowania energii elektrycznej i ciepłej z odnawialnych źródeł

energii oraz z nośników konwencjonalnych. Przewiduje się także istotny wzrost stawek ubezpieczenia dla przedsiębiorstw obciążających środowisko, w szczególności gazami cieplarnianymi.

Literatura

- [1] Bartoszewicz-Burczy H., *Ekonomika wykorzystania energii źródeł odnawialnych do produkcji energii elektrycznej*, „Energetyka” 2002, nr 7.
- [2] Bień J., *Przyszłość w biomase*, „Ekoprofit” 2003, nr 3 (67).
- [3] Burchard-Dziubińska M., *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Unii Europejskiej – funkcjonowanie rynku energii elektrycznej*, [w:] *Ekologiczny wymiar integracji Polski z Unią Europejską*, red. S. Czaja, Katedra Ekonomii Ekologicznej AE Wrocław oraz Europejskie Stowarzyszenie Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych – Oddział Polski, Biblioteka „Ekonomia i Środowisko”, nr 31, Łądek Zdrój 2004.
- [4] Ciok Z., *Ochrona środowiska w elektroenergetyce*, „Podstawowe Problemy Współczesnej Techniki”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [5] Dubiel J., *Ku źródłom energii odnawialnej*, „Ekoprofit” 2001, nr 2 (60).
- [6] Dzik T., Mięso R., *Wytwarzanie i spalanie paliw z biomasy pochodzenia roślinnego w małej i mikroskali*, Szkoła Ochrony i Inżynierii Środowiska im. W. Goetla, AGH, Kraków 2005.
- [7] Fiedor B., Graczyk A., *Zrównoważony rozwój energetyki w świetle polityki energetycznej Unii Europejskiej*, [w:] *Zrównoważony rozwój – doświadczenia polskie i europejskie*, red. S. Czaja, Katedra Ekonomii Ekologicznej AE Wrocław oraz Europejskie Stowarzyszenie Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych – Oddział Polski, Biblioteka „Ekonomia i Środowisko”, nr 33, Nowa Ruda 2005.
- [8] Górecki W., *Uwarunkowania prawne i ekonomiczne rozwoju geotermii w Polsce*, Materiały Ogólnopolskiego Kongresu Geotermalnego nt.: „Geotermia w Polsce – doświadczenia, stan aktualny, perspektywy rozwoju”, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- [9] Karnowski S., *Doświadczenia ciepłowni w spalaniu biomasy – aspekty ekonomiczne*, „Nowa Energia” 2008, nr 1.
- [10] Karwasz Z., *Świadectwa pochodzenia energii elektrycznej wytworzonej w skojarzeniu z produkcją ciepła*, „Ekonomia i Środowisko”, Czasopismo Europejskiego Stowarzyszenia Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, nr 2 (32), Białystok 2007.
- [11] Kassenberg A., *Pakiet klimatyczno-energetyczny a sprawa Polski*, „Biuletyn Klimatyczny” 2008, nr 1.
- [12] Kościelniak H., *Forms of Conducting Economic Activities in the EU*, [w:] *Interdisciplinary Approach to Sustainable Development*, red. R. Lescroart, P. Pachura, T. Nitkiewicz, Virton, ISI Pierrard HEC du Luxembourg, 2007.
- [13] Kruczek H., Miller R., Tatarek A., *Spalanie i współspalanie biomasy – korzyści i zagrożenia*, „Gospodarka Paliwami i Energią” 2003, nr 3.
- [14] Lewandowski W.M., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa 2002.
- [15] Lorek E., *Polska polityka energetyczna w warunkach integracji z Unią Europejską*, AE, Katowice 2007.

- [16] Ney R., *Perspektywy rozwoju energii geotermalnej w świetle polityki energetycznej*, „Polityka Energetyczna” 2001, t. 4, z. 1,.
- [17] *Ochrona środowiska 2007*, GUS, Warszawa 2007.
- [18] Pietruszko S.M., *Ogniwa i systemy fotowoltaiczne*, Fotowoltaika Polska PVPL, Gdańsk 2000.
- [19] *Podstawy gospodarki surowcami energetycznymi*, red. E. Mokrzycki, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
- [20] Soliński I., *Uwarunkowania opłacalności wykorzystania biomasy drewna w ciepłownictwie*, [w:] *Recyklacja odpad*, red. P. Fecko i V. Cablik, Vysoká Škola Báňská, Ostrava 2007.
- [21] *Statistical Review of World Energy*, British Petroleum, 2008.
- [22] Ściążko M., Kubica K., *Zastosowanie biomasy w energetyce*, „Karbo” 2002, t. 47, nr 11.
- [23] Wiczorek W., *Energia odnawialna i paragrafy*, „Nafta & Gaz Biznes” 2006, nr 2/3/4 (103).

TECHNICAL, ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES USE

Summary

The analysis of the structure of energy consumption makes a base for research on technical, environmental and economic aspects of management of energy produced from primary energy sources. The paper presents the share of particular energy sources in global power and heat energy production and, in this context, energy sources management in Poland. Particular attention is paid to renewable energy production and consumption according to energy generation sources. Limits for solar energy, wind energy and geothermal energy use in Poland and on global scale are presented in the final part of the article.