

# Gdy skończą się kopaliny – nie będziemy mieć wyboru... Energia z wody

Autor: Marek Łukasz Michalski, Politechnika Krakowska

(„Energia Gigawat” – nr 8/2006)

W XX wieku zaludnienie naszej planety wzrosło trzykrotnie, natomiast zużycie paliw kopalnianych wzrosło aż ponad dwudziestokrotnie. Tabela 1 zawiera podstawowe dane obrazujące światowe zużycie energii pierwotnej. Warto zauważyć, że zaledwie 12,2% (54,6 EJ) tej energii pochodzi ze źródeł odnawialnych.

Tabela 1 Światowe zużycie energii pierwotnej

Zużycie energii pierwotnej (2002)	Energia pierwotna				Energia elektryczna			Energia ciepła			
	[Gt]	[Tcm]	[EJ]	% pierw. [%]	% odnaw. [%]	[TWh]	% elektr. [%]	% odnaw. [%]	[EJ]	% ciepl. [%]	% odnaw. [%]
Ropa naftowa	3,65		152,7	34,1%		1 161	7,3%		0,94	7,9%	
Gaz ziemny		2,62	98,8	22,0%		3 065	19,2%		6,00	50,4%	
Węgiel	4,79		115,8	25,8%		6 120	38,3%		4,09	34,4%	
<i>kamienny</i>	3,91		108,0	24,1%		5 363	33,6%		3,37	28,3%	
<i>brunatny</i>	0,88		7,8	1,7%		757	4,7%		0,72	6,1%	
Energia jądrowa			26,4	5,9%		2 660	16,7%				
Biomasa*			44,00	9,81%	80,5%	172	1,08%	5,8%	0,51	4,3%	59,6%
Energia wody*			9,63	2,15%	17,6%	2 676	16,77%	90,6%			
Energia geotermalna*			0,60	0,13%	1,1%	52	0,33%	1,8%	0,15	1,2%	17,1%
Energia wiatru*			0,19	0,04%	0,3%	52	0,33%	1,8%			
Energia słoneczna*			0,21	0,05%	0,4%	2	0,01%	0,1%	0,20	1,7%	23,2%
<b>RAZEM</b>			<b>448,4</b>	<b>100,0%</b>		<b>15 960</b>	<b>100,0%</b>		<b>11,90</b>	<b>100,0%</b>	
<b>ODNAWIALNE(*)</b>			<b>54,6</b>	<b>12,2%</b>	<b>100,0%</b>	<b>2 954</b>	<b>18,5%</b>	<b>100,0%</b>	<b>0,86</b>	<b>7,2%</b>	<b>100,0%</b>

Światowa gospodarka oparta jest obecnie w dominującym stopniu (87,8%) na paliwach kopalnianych. W celu określenia „wystarczalności” surowców i możliwości zrównoważonego rozwoju energetyki, bazując na rezerwach i wydobyciu, powszechnie stosowany jest wskaźnik R/P (stosunek rezerw do wydobycia surowca, ang. reserves-to-production (R/P) ratio). Tabela 2 przedstawia wskaźniki R/P dla trzech podstawowych paliw kopalnianych: ropy naftowej, gazu ziemnego i węgla. Wskaźniki te przedstawiają na jak długo wystarczą zasoby, które się opłaca wydobywać (tzn. rezerwy) na obecnym poziomie zużycia.

Tabela 2 Wskaźniki R/P dla paliw kopalnianych

Paliwa kopalniane	rezerwy
	roczne wydobycie
ropa naftowa	około 40 lat
gaz ziemny	około 60-67 lat
węgiel	około 185-200 lat

Szersza dyskusja na temat rezerw, wzrostu rezerw, zasobów i zasobów prognostycznych wykracza poza ramy tego artykułu. W ujęciu ogólnym możemy stwierdzić, że w miarę jak wyczerpywane są udokumentowane rezerwy paliw kopalnianych, w ramach poszukiwań i za

pomocą nowych technologii poszukiwawczych są nowe rezerwy i/lub eksploatacja poprzednio znalezionych, wcześniej nierentownych w wydobyciu zasobów staje się opłacalna. Nie postulujemy, że paliwa kopalne zostaną zupełnie wyczerpane, jednak jest ich coraz mniej w związku z wysokim i wciąż wzrastającym tempem wydobycia.

Oprócz tradycyjnego zastosowania biomasy, największym źródłem energii odnawialnej jest energia wody. Energia ta znana jest od tysięcy lat. Jednak obecnie, bezpośrednie korzystanie z tej energii jest coraz rzadziej spotykane. Energia potencjalna i kinetyczna płynącej wody wykorzystywana jest głównie do produkcji energii elektrycznej.

Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje elektrowni wodnych: duże i małe. Nie ma jednak jednomyślności w gronie specjalistów, co do określenia maksymalnej mocy „małej” elektrowni wodnej. Z reguły jest to moc mieszcząca się w przedziale od 2,5 do 30 MW. Współcześnie coraz częściej za „małe” uważa się elektrownie o mocy poniżej 10 MW. Możliwości wykorzystania wody są ściśle uzależnione od topografii akwenu, gdyż potencjał energetyczny jest proporcjonalny do ilości przepływającej wody i różnicy poziomu terenu.

Produkcja energii pozyskanej z wody wynosiła w roku 2002 na świecie około 2676 TWh, a zainstalowana moc do jej produkcji 750 GW. Duże elektrownie wodne wytwarzają około 20% energii elektrycznej ogółem na świecie. W krajach bogatych w energię wodną takich jak np. Norwegia, pokrywane jest blisko 100% zapotrzebowania na energię elektryczną. Według prognoz, dynamika wykorzystywana energii wodnej na świecie będzie wzrastać o około 1,8% w ciągu roku. Wzrost ten nie będzie jednak równomierny we wszystkich krajach. Wystąpi on jedynie w tych rejonach świata, gdzie istnieją ku temu sprzyjające warunki.

Tabela 3 przedstawia światowy potencjał ekonomiczny, techniczny i teoretyczny energii wodnej zawartej w rzekach, fiordach, morzach i oceanach.

Tabela 3 Światowe zasoby energii wody

	Produkcja i moc (2002 rok)		Rezerwy (R)		Zasoby udokumentowane (Z)		Zasoby prognostyczne (ZP)	
	[TWh/rok]	[GW]	[TWh/rok]	[EJ/rok]	[TWh/rok]	[EJ/rok]	[TWh/rok]	[EJ/rok]
<b>Energia wody</b>								
Elektrownie wodne	2 676	750	8 000	28,8	16 000	57,6	16 000	57,6
<b>Niekonwencjonalne: oceany i morza</b>							2 063 056	7 427
<i>Przypływy i odpływy</i>							21 944	79
<i>Fale</i>							18 056	65
<i>Różnica temperatur</i>							2 000 000	7 200
<i>Różnica zasolenia</i>							23 056	83

uwagi: całkowity potencjał = R + Z + ZP (40 000 TWh/rok dla elektrowni wodnych)

Konwencjonalne zasoby energii wodnej, możliwej do wykorzystania w elektrowniach wodnych na świecie szacowane są na około 40000 TWh/rok (144 EJ/rok). Zasoby te przekraczają o 150% całkowite, światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną. Z zasobów tych około 8000 TWh stanowią rezerwy reprezentujące potencjał ekonomiczny, który może być obecnie wykorzystany w sposób rentowny.

### **Energia oceanów**

Energia kinetyczna i termalna zawarta w oceanach i morzach szacowana jest na około 7 400 EJ i ponad piętnastokrotnie przekracza całkowite zapotrzebowanie ludzkości na energię na świecie. Większość, bo aż 97% jej zasobów stanowi energia związana z różnicą temperatur, a po około 1% przypada na energię potencjalną oraz kinetyczną przyływów i odpływów wód, fal i wynikającą z różnicy zasolenia. Ilość energii zawartej w oceanach i morzach jest praktycznie nieograniczona jednak większość tej energii jest rozproszona lub niedogodna do eksploatacji. Istnieją nieliczne przykłady osiągania pożytków z energii mórz i oceanów, przeważnie blisko wybrzeży, na obszarach gdzie występują duże i częste odpływy i przyływy.

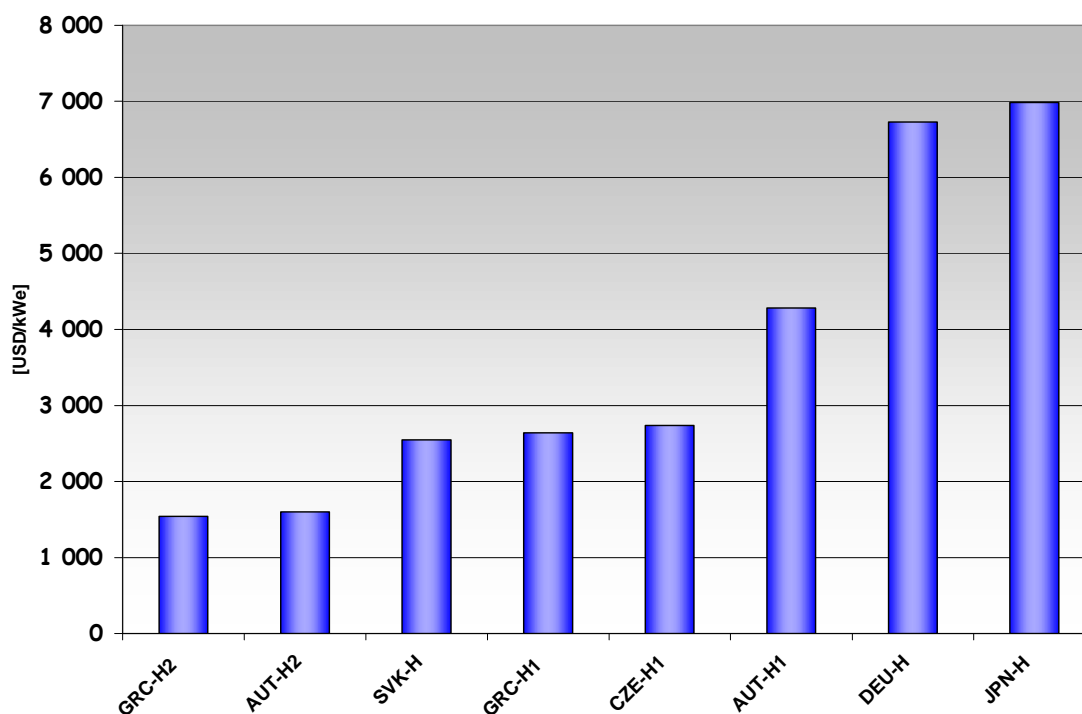
W niektórych krajach, kontynuowane są badania nad wykorzystaniem energii fal. Jeśli uda się pokonać różnorakie bariery techniczne to energia ta mogłaby docelowo być dostępna nawet na poziomie 300 TWh/rok na świecie. Trwają też prace naukowo-badawcze nad wykorzystaniem energii przepływu wody przy małych różnicach lustra wody. Jednak również ta technologia jest nadal w fazie eksperymentów i zaczyna być opłacalna wtedy, gdy średnia prędkość wody przekracza 1,5 m/s. Większość wód płynie zbyt wolno w dostępnych do eksploatacji akwenach by umożliwić takie zastosowanie. Potencjalny koszt budowy elektrowni wykorzystujących energię z oceanów może wynieść od 1500 do 3000 USD/kWe, a sama energia może kosztować 60–200 USD/MWh. Wykorzystywanie różnicy temperatury wody jest również przedmiotem zainteresowań naukowców, jednak nie istnieją jeszcze technologie wytwarzania znaczących ilości energii.

### **Hydroelektrownie**

Na świecie wykorzystane jest jedynie około 1/3 potencjału ekonomicznego energii z elektrowni wodnych (por. tabela 3). Wynika to przede wszystkim z dużego kosztu budowy tych elektrowni. W krajach należących do OECD wskaźnik wykorzystania korzystnej lokalizacji akwenów na opłacalne elektrownie wodne jest znacznie wyższy – wynosi około 80% potencjału ekonomicznego.

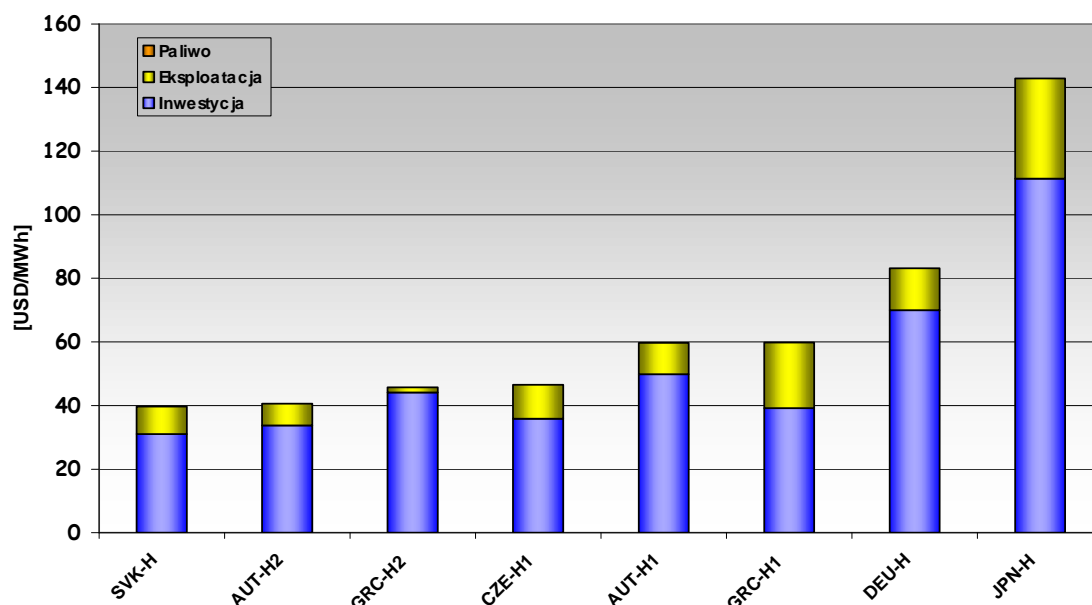
Energia wody jest obecnie drugim największym (17,6% udziału ogółem) źródłem energii odnawialnej i największym odnawialnym źródłem energii elektrycznej: ponad 90% udziału ogółem (por. tab. 1). Podstawowymi nakładami związanymi z budową elektrowni wodnej są koszty projektu i analizy wpływu elektrowni na środowisko naturalne oraz koszty prac budowlanych (zazwyczaj 50 – 60% kosztów ogółem), zakupu osprzętowania i turbin. Z kolei przeprowadzono analizę opartą na danych charakteryzujących osiem typowych elektrowni wodnych w sześciu krajach, w tym jednej elektrowni przepływowej, oznaczonej symbolem AUT-H1. Koszt budowy elektrowni wodnych (por. rys 1) małej i średniej wielkości o mocy od 714 kW do 123,5 MW wynosi od 1541 do 6985 USD/kWe (średnio 3623 USD/kWe).

Rys. 1 Koszt budowy hydroelektrowni [USD/kWe]



Budowa elektrowni wodnej trwa zazwyczaj od roku do pięciu lat w zależności od jej wielkości i mocy. Przeważnie jest to duża inwestycja, przewidziana do wieloletniej eksploatacji - od 30 do 60 lat. Rysunki 2 i 3 prezentują koszty uzyskania energii elektrycznej w 8 elektrowniach objętych analizą.

Rys. 2 Koszt energii elektrycznej uzyskanej z hydroelektrowni (koszt kapitału = 5%)



Rys. 3 Koszt energii elektrycznej uzyskanej z hydroelektrowni (koszt kapitału = 10%)

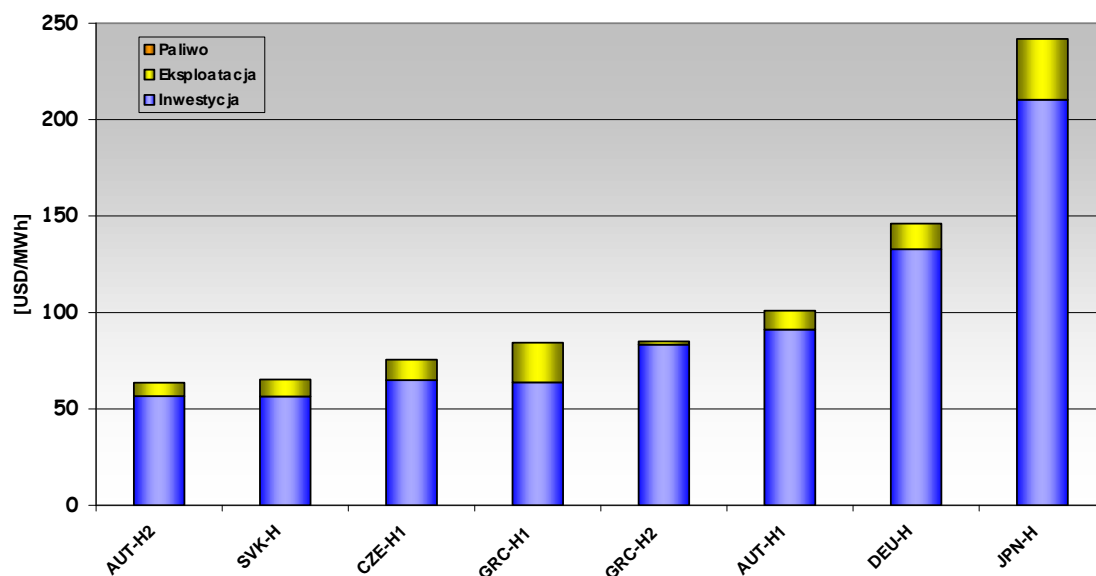


Tabela 4 zawiera dane o kosztach energii elektrycznej pochodzącej z objętych analizą hydroelektrowni. Spłata kredytu zaciągniętego na inwestycje stanowi największą część nakładów na hydroelektrownie. Przy 5% koszcie kapitału (por rys. 2) spłata nakładów na inwestycje wynosi od 31 do 113,30 USD/MWh (średnio 51,89 USD/MWh, co stanowi 80,1% kosztu energii). Przy 10% koszcie kapitału (por. rys. 3) spłata nakładów na inwestycje pochłania od 56,60 do 210,30 USD/MWh (średnio 94,99 USD/MWh – stanowi to 88,1% kosztu energii). Warto zwrócić uwagę na stosunkowo niski koszt eksploatacji, który wynosi od 1,60 do 31,60 USD/MWh niezależnie od kosztu kapitału.

Tabela 4 Wydajność, koszt budowy i koszt energii z hydroelektrowni

	<i>min</i>	<i>max</i>	$\mu$	$\% \mu$	$\sigma$
<b>Ilość elektrowni objętych analizą:</b>			<b>8</b>		
<b>Żywotność [lat]</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>42,5</b>		<b>8,9</b>
<b>Moc [MWe]</b>	<b>0,7</b>	<b>123,5</b>	<b>21,1</b>		<b>41,9</b>
<b>Wydajność [%]</b>	<b>25,0%</b>	<b>59,5%</b>	<b>48,3%</b>		<b>12,2%</b>
<b>Inwestycja [USD/kWe]</b>	<b>\$1 541,00</b>	<b>\$6 985,00</b>	<b>\$3 632,25</b>		<b>\$2 161,80</b>
<b>Koszt energii elektr. [USD/MWh] przy koszcie kapitału 5%</b>					
inwestycja	\$31,00	\$111,30	\$51,89	80,1%	\$27,01
eksploatacja	\$1,60	\$31,60	\$12,88	19,9%	\$9,30
paliwo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	0,0%	\$0,00
<b>RAZEM</b>	<b>\$39,70</b>	<b>\$142,90</b>	<b>\$64,76</b>	<b>100%</b>	<b>\$34,65</b>
<b>Koszt energii elektr. [USD/MWh] przy koszcie kapitału 10%</b>					
inwestycja	\$56,60	\$210,30	\$94,99	88,1%	\$53,04
eksploatacja	\$1,60	\$31,60	\$12,88	11,9%	\$9,30
paliwo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	0,0%	\$0,00
<b>RAZEM</b>	<b>\$63,60</b>	<b>\$241,90</b>	<b>\$107,86</b>	<b>100%</b>	<b>\$60,19</b>

Uwagi: Łączny minimalny i maksymalny koszt energii obliczony został dla całych elektrowni (nie jest to więc suma minimalnych i maksymalnych kosztów inwestycji i eksploatacji dla odrębnych elektrowni).

wydajność (ang. capacity factor) = (średnia moc produkowana) / (moc nominalna)

$\mu$  = średnia,  $\sigma$  = odchylenie standardowe

Podsumowując, otrzymywanie energii elektrycznej z przepływu wody wymaga dużych nakładów inwestycyjnych. Największy wpływ na cenę energii ma koszt zainwestowanego kapitału. Koszt energii produkowanej w elektrowniach wodnych objętych badaniami mieści się w przedziałach:

- od 39,70 do 142,90, średnio 64,76 USD/MWh przy koszcie kapitału 5%,
- od 63,60 do 241,90, średnio 107,86 USD/MWh przy koszcie kapitału 10%.

Dla hydroelektrowni ważny jest również wskaźnik wydajności (ang. capacity factor), który określa proporcje średniej mocy uzyskiwanej w czasie eksploatacji do mocy nominalnej. Dla badanych hydroelektrowni wyniósł on od 25% do 59,5% – średnio 48,3%.

## Bariery

Budowa dużych elektrowni wodnych wiąże się z wznoszeniem tam, które zazwyczaj wywierają negatywny wpływ na środowisko naturalne – proporcjonalnie do wielkości tamy i mocy elektrowni. Do negatywnych następstw można najczęściej zaliczyć:

- Zalanie terenów ponad tamą. Koszt odszkodowań związanych z zalaniem terenów oraz koniecznością przesiedlenia mieszkańców jest często tak wysoki, że projekt staje się nierentowny.
- Zmiana natężenia przepływu wody poniżej tamy.
- Utrudnienie wędrówki ryb bądź zabijanie ryb przez turbiny.