

Waldemar Kołodziejczyk

OTEC - Energia z oceanów

Koło Naukowe Energetyków
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska
Konferencja: Nowoczesna Energetyka Europy Środkowo-Wschodniej 2015

Opiekun naukowy: dr inż. Karolina Błogowska

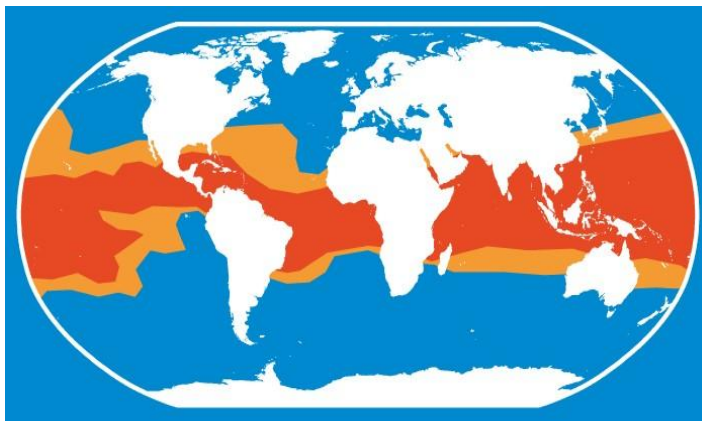
Abstrakt

Świat potrzebuje coraz więcej energii. Jest ona dostępna na Ziemi w różnych postaciach. Stajemy przed dużym wyzwaniem: wyczerpujące się zasoby ropy, gazu czy węgla każą nam wdrażać i ciągle udoskonalać nowe technologie pozyskiwania energii. Coraz częściej sięgamy do źródeł odnawialnych, które w optymistyczny sposób rysują naszą przyszłość energetyczną. Polityka międzynarodowa również kładzie nacisk na zieloną energię, która rzeczywiście może nam pomóc. Obiecującym przykładem jest OTEC (ang. Ocean Thermal Energy Conversion), genialny w swej prostocie system proponujący rozwiązanie wprost z głębin oceanów. Wody naszej planety kumulują energię słoneczną, więc wykorzystując różnicę temperatur wód znajdujących się na różnych głębokościach, możemy przy pomocy silnika cieplnego wygenerować olbrzymie ilości energii. Ile? Według Instytutu Energii Słonecznej nawet jednego dnia w strefie równikowej słońce dostarcza do oceanu ekwiwalent 250 miliardów baryłek ropy. Zdecydowanie warto więc sięgnąć choćby po jej część. W artykule tym omówione zostanie działanie systemu OTEC, jego opłacalność oraz zalety i wady.

1. WSTĘP

Morza i oceany zajmują ponad 70% powierzchni Ziemi. Woda na ich powierzchni nagrzewa się pod wpływem promieniowania słonecznego i kumuluje ogromną ilość energii słonecznej, która może być przez nas wykorzystywana. Pojawia się zasadnicze pytanie: jak wykorzystać ten potencjał w sposób ekonomicznie opłacalny?. Aby móc rentownie pozyskiwać tę energię, różnica temperatur między różnymi warstwami wody powinna wynosić minimum 20°C.

Na przedstawionej obok ilustracji kolorem pomarańczowym są zaznaczone najbardziej korzystne ich lokalizacje. Temperatura na powierzchni oceanów, zwłaszcza w okolicy równika, wynosi około 30/40°C. Temperatura wody na głębokościach rzędu 500 do 1000 metrów to ok. 5/7°C. Taka różnica jest już wystarczająca do wykorzystania energii cieplej oceanów przez



przemianę w jej inny rodzaj. Do wytwarzania energii elektrycznej z energii termicznej wód stosuje się tzw. silnik cieplny. Maszyna ta jest umieszczona między ciepłym a zimnym źródłem energii. Zasada jest następująca: za pomocą cieplej wody wytwarza się parę niskociśnieniową, para ta obraca turbinę, która połączona jest z generatorem prądu.

Generator ten wytwarza prąd elektryczny, po czym para zostaje skroplona za pomocą zimnej wody, a powstała ciecz wraca do obiegu. Istnieją trzy rozwiązania techniczne produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem ciepła oceanów (tzw. energii maretermicznej). Są to systemy z obiegiem: otwartym, zamkniętym i mieszanym.

2. WIĘCEJ O OTEC

Próby rozwijania i udoskonalania technologii OTEC rozpoczęły się w 1880r. W 1881r., Jacques Arsene d'Arsonval, francuski fizyk, zaproponował zainteresowanie się energią ciepłą oceanów. Student D'Arsonvala, Georges Claude, zbudował pierwszą małą elektrownię na bazie OTEC, w Matanzas na Kubie w 1930 roku. System generował 22 kW energii elektrycznej za pomocą niskociśnieniowej turbiny. Konstrukcja jednak szybko została zniszczona przez sztorm. W 1935 roku Claude zbudował elektrownię na pokładzie 10000-tonowego statku towarowego zacumowanego u wybrzeży Brazylii. Pogoda i fale zniszczyły statek, zanim elektrownia zdążyła wygenerować moc użyteczną. Ponad 20 lat później francuscy naukowcy zaprojektowali elektrownię o mocy 3 MW dla Abidżanu, stolicy Wybrzeża Kości Słoniowej. Projekt nigdy nie został ukończony, ponieważ odkrycie nowych złóż dużej ilości taniej ropy naftowej sprawiło, że przedsięwzięcie stało się nieopłacalne. W 1962 roku J. Anderson wraz z synem skoncentrowali się na zwiększeniu wydajności pozyskiwania energii. Opatentowali w 1967 roku nowy projekt: „cykl zamknięty”. Ich pomysł ulepszał oryginalny system zamkniętego obiegu według Rankina i

sprawił, że wytwarzana moc była mniej kosztowna niż ropa czy węgiel. W tym czasie jednak ich badania przyćmiła wizja ówczesnych ekonomistów, którzy twierdzili, że tylko węgiel i atom są przyszłością światowej energetyki. Jedynie Japonia i USA w tamtych latach zainteresowały się OTEC i do tej pory są najbardziej zaangażowanymi krajami, przyczyniającymi się do rozwoju tej technologii.

W 1973 roku, w wyniku wojny na Bliskim Wschodzie, ceny ropy zwiększyły się trzykrotnie. Rząd USA zainwestował 260 milionów dolarów na badania poświęcone energii maretermicznej. Prezydent Carter podpisał wówczas ustawę, która zobowiązała USA do osiągnięcia 10 000 MW elektryczności z systemów OTEC do 1999 roku. W 1974 roku na wybrzeżu Kona na Hawajach założono *Natural Energy Laboratory of Hawaii*. Hawaje najbardziej nadawały się do systemu OTEC ze względu na ciepłą wodę powierzchniową, łatwy dostęp do bardzo zimnej wody na dużych głębokościach i wysokie koszty konwencjonalnej energii. Laboratorium stało się wiodącym obiektem testowym dla omawianej technologii.

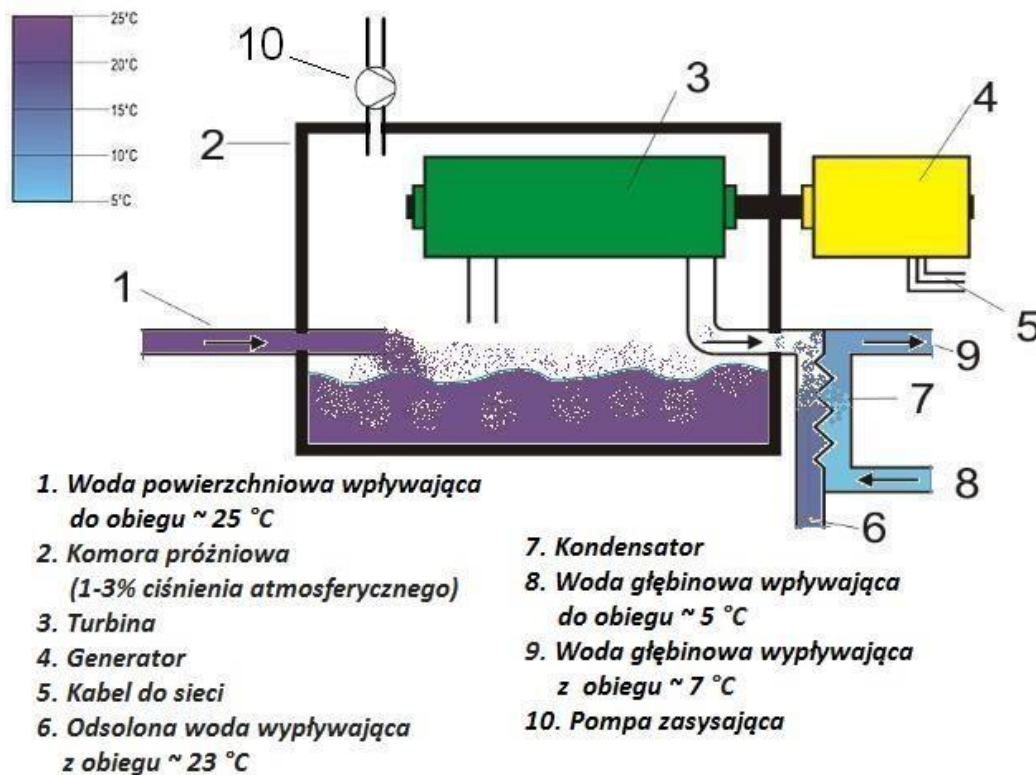
Japonia prowadziła wówczas równoległe badania z USA. W 1970 *Tokyo Electric Power Company* z powodzeniem zbudowała i wdrożyła 100kW elektrownię z cyklem zamkniętym na wyspie Nauru. Zakład rozpoczął działalność w 14 października 1981 r. i produkował 120 kW energii elektrycznej, z czego 90 kW było używane do zasilania samego systemu, a pozostałe 30kW wykorzystano do zasilania pobliskiej szkoły i innych miejsc. W tym samym roku znaczące było osiągnięcie rosyjskiego inżyniera, dr Alexandra Kalina, który zastosował mieszaninę amoniaku i wody w cyklu zamkniętym. Nowy roztwór znacznie poprawił sprawność projektu. W 1994 roku w *Saga University* zaprojektowano i zbudowano 4,5 kW mini elektrownię, mającą na celu testowanie nowo wymyślonego cyklu Uehara, pochodzącego od nazwiska jego wynalazcy Haruo Uehara. Cykl ten obejmuje procesy absorpcji i wydobywcze, które pozwolą wyprzedzić cykl Kalina o 1-2%.

Obecnie *Instytut Energii Oceanicznych w Saga University* jest liderem w dziedzinie badań nad OTEC, a także koncentruje się na wielu wtórnych korzyściach płynących z tej technologii. Dziś prowadzonych jest kilka projektów, między innymi przez *Ocean Thermal Energy Corporation*, która planuje budowę 10 MW elektrowni na Wyspach Dziewiczych oraz 5-10 MW na Bahamach. Na Hawajach istnieje już elektrownia 10 MW z technologią obiegu zamkniętego, a w najbliższej przyszłości planowana jest budowa jej dziesięciokrotnie większego odpowiednika. Również Chiny i Japonia podjęły się budowy systemów o mocy 10 MW. Obecnie jest zatem kilka ośrodków, które dzięki energii maretermicznej zasilają mieszkania, fabryki i inne obiekty.

3. OBIEG OTWARTY

W cyklu otwartym używa się bezpośrednio ciepłej wody powierzchniowej do tworzenia energii elektrycznej. Ciepła woda morska jest najpierw pompowana do niskociśnieniowego zbiornika, co powoduje jej wrzenie. W większości rozwiązań powstała para napędza niskociśnieniową turbinę, dołączoną do generatora prądu elektrycznego. Woda w stanie lotnym, która w komorze niskiego ciśnienia straciła wszystkie zanieczyszczenia (także sól), jest czystą, słodką wodą, nadającą się do spożycia, nawadniania upraw, itd. Para jest kondensowana dzięki zimnej wodzie z głębszych warstw oceanu.

Badania związane z cyklem otwartym rozpoczęto w 1979 roku w *Instytucie Energii Słonecznej (SERI)* i były finansowane przez Amerykański Departament Energii. Parowniki i odpowiednio skonfigurowane kondensatory bezpośredniego kontaktu zostały opracowane i opatentowane przez SERI. Pierwotny projekt stosował dwie równoległe osiowo turbiny, przy użyciu najnowszych fazowych wirników, stosowanych w dużych turbinach parowych. Później, w *Narodowym Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL)*, opracowano wstępny projekt koncepcyjny, bazujący na otwartym cyklu, osiągającym do 210 kW. Ta konstrukcja zintegrowała wszystkie składniki cyklu, a mianowicie parownik, skraplacz i turbinę w jednym zbiorniku próżniowym z zamocowaną na górze turbiną, aby zapobiec zagrożeniu zalania przez wodę.

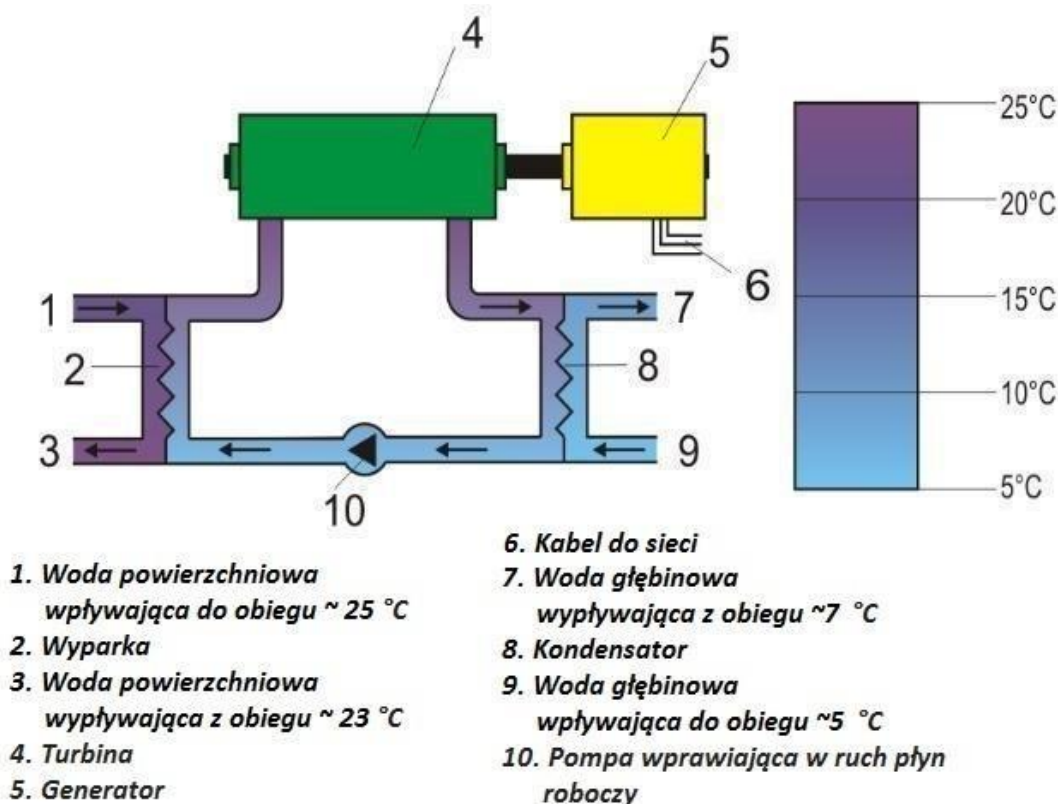


Schemat obiegu

4. OBIEG ZAMKNIĘTY

Systemy z obiegiem zamkniętym używają cieczy o niskiej temperaturze wrzenia do napędzania turbin w celu wytworzenia energii elektrycznej. Ciepła, powierzchniowa woda morska jest pompowana przez wymiennik ciepła w celu odparowania cieczy. Rozszerzające swoją objętość opary cieczy wprawiają w ruch turbogenerator. Zimna woda, pompowana przez drugi wymiennik ciepła, skrapla opary czynnika roboczego do stanu ciekłego, który jest gotowy do pracy w kolejnym cyklu. Popularnym płynem roboczym jest tani, łatwo dostępny i wygodny w transporcie amoniak. Niestety, ma także wady: jest toksyczny i palny. Alternatywą dla niego może być nietoksyczny i niepalny chlorofluorocarbon, który jednak przyczynia się do zmniejszania warstwy ozonowej. Węglowodory (np. propan) są również odpowiednimi kandydatami, lecz podobnie jak amoniak, są bardzo łatwopalne. Wielkość elektrowni z sy-

stemem OTEC jest zależna od ciśnienia pary płynu roboczego. Wraz z rosnącym ciśnieniem pary, rozmiar wymienników ciepła, turbiny oraz innych aparatów również ulega zwiększeniu.



Schemat obiegu

5. OBIEG MIESZANY

Obieg ten jest kombinacją obu poprzednich układów. Ciepłą wodę odparowuje się w komorze próżniowej, tak jak w obiegu otwartym. Następnie parę wodną wykorzystuje się do odparowania cieczy, pracującej w obiegu zamkniętym, na przykład amoniaku. Dodatkowo para wodna, odparowując amoniak, skrapla się i wytwarza jednocześnie odsoloną wodę. Obieg zamknięty wytwarza prąd elektryczny, jak już było opisane powyżej.

6. SPRAWNOŚĆ SYSTEMU

Silnik cieplny ma tym wyższą wydajność, im większa jest różnica temperatur obu warstw wody. W oceanach różnica temperatur pomiędzy wierzchnimi i głębokimi warstwami wody jest najkorzystniejsza okolicach równika. To rząd wielkości 20/25 °C. Stąd prosty wniosek, że system OTEC ma sens w strefie międzyzwrotnikowej. Projekt ma olbrzymi potencjał: finalny produkt może być od 10 do 100 razy większy niż w innych systemach energetycznych, wykorzystywanych na morzu, takich jak energia pływów. Zakłady OTEC mogą pracować w sposób ciągły, niezależny. Głównym wyzwaniem technologicznym jest generowanie znacznych ilości energii z relatywnie małych różnic temperatur. Systemy OTEC początkowo osiągały sprawność w granicach 1-3%, znacznie poniżej teoretycznej maksymalnej wydajności,

która dla tej różnicy temperatur wynosi 6-7% . Nowoczesne konstrukcje pozwalają zwiększyć sprawność porównywalną do efektywności według Carnota.

7. INNE KORZYŚCI Z SYSTEMU OTEC

Podczas wytwarzania energii maretermicznej powstają produkty uboczne, które można wykorzystać do innych celów niż energetyka. Na przykład odsolona czysta woda może być wytwarzana w otwartym lub mieszanym cyklu. Eksperymenty wskazują, że system 2 MW może wyprodukować każdego dnia około 4300 m³ odsolonej wody.

Kolejnym pomysłem jest wykorzystywanie zimnej wody, która przechodzi przez układ, do chłodzenia budynków. W roku 2010 zakład energetyczny w Kopenhadze stworzył projekt chłodniczy, bazujący na OTEC. Zakład dostarcza zimną wodę morską do obiektów handlowych i przemysłowych, co w efekcie zmniejsza zużycie energii elektrycznej poświęconej na obsługę klimatyzacji aż o 80%.

Technologia OTEC może pomagać także rolnictwu poprzez chłodzenie gleb. Zimna woda morska, płynąc przez sieć podziemnych rurociągów, schładza otaczającą je glebę.

To rozwiązanie pozwala na uprawę w strefie podzwrotnikowej roślin, które wyewoluowały w klimacie umiarkowanym. Dr John P. Craven, dr Jack Davidson i Richard Bailey opatentowali ten system i przetestowali w ośrodku badawczym w *Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA)*. Badania wykazały, że ponad 100 różnych gatunków roślin może być uprawianych przy użyciu tego systemu.

Kolejnym atutem OTEC jest pozyskiwanie wodoru, który może być wytwarzany w procesie elektrolizy przy użyciu energii elektrycznej pochodzącej z systemu. Wytworzona para wodna ze związkami elektrolitów, dodawanych do poprawy efektywności, jest relatywnie czystym medium do produkcji wodoru. Konstrukcje typu OTEC mogą być więc tworzone do generowania dużych ilości wodoru. Głównym wyzwaniem technologicznym jest koszt w stosunku do innych źródeł energii i paliw.

Ostatnim pomysłem na wykorzystanie OTEC jest możliwość pozyskania pierwiastków, soli i innych form chemicznych, występujących w małych ilościach w morskiej wodzie, a trudno pozyskiwanych na Ziemi. W przeszłości większość analiz ekonomicznych dowodziła, że wydobycie z oceanu pierwiastków śladowych byłoby nieopłacalne, przede wszystkim dlatego, że trzeba by było wykorzystać olbrzymie ilości energii potrzebnej do pompowania wody. Dzięki elektrowniom OTEC koszty pozyskiwania takich pierwiastków wiążą się jedynie z technologią ekstrakcji.

8. SYTUOWANIE ELEKTROWNI

Najczęściej zakłady OTEC są sytuowane na lądzie, stosunkowo blisko brzegu. Taka lokalizacja daje sporą przewagę nad elektrowniami pływającymi. Elektrownie zbudowane na lądzie nie wymagają specjalistycznego cumowania, długich kabli zasilających lub bardziej intensywnej konserwacji, koniecznej ze względu na niekorzystne warunki (słone powietrze, wilgotność, wysokie fale). Zakłady OTEC mogą być instalowane w miejscach osłoniętych, stosunkowo bezpiecznych od burz i sztormów. Prąd, odsolona woda oraz inne produkty systemu mogą być bezpiecznie i szybko dostarczane do odbiorców. Preferowane lokalizacje obejmują miejsca ze stromo schodzącym do wody brzegiem i stosunkowo gładkim dnem morskim. Miejsca te minimalizują długość rur, doprowadzających zimną wodę. Elektrownie OTEC można budować również w głębi lądu, daleko od brzegu, zapewniając większą ochronę przed burzami. W takim przypadku, łatwy dostęp do budowy i eksploatacji pomaga obniżyć koszty.

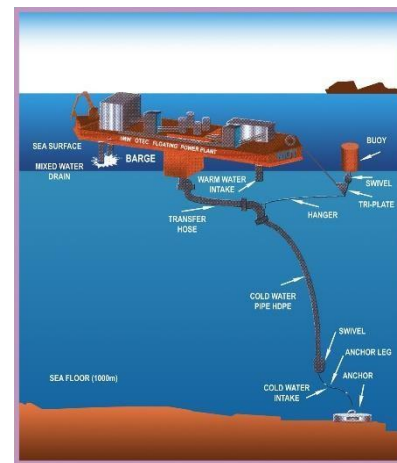


Natural Energy Laboratory of Hawaii

Inne rozwiązanie to usytuowanie systemu pod wodą (około 100 m głębokości), na specjalnych półkach, w celu zbliżenia się do zimnej wody i zwiększenia sprawności. Ten typ konstrukcji jest dziś stosowany na morskich platformach wiertniczych. Trzeba jednak zastosować szereg zabezpieczeń, aby system nie uległ awarii w wypadku sztormu czy pływów.

Technologia wykonania takiej elektrowni jest relatywnie droga i zwróciłaby się w znacznie dłuższym czasie niż przeciętna inwestycja w system OTEC. Fakt ten sprawia, że jest mało atrakcyjną perspektywą.

Są miejsca, w których niemożliwe jest zbudowanie elektrowni na brzegu lub platformie. Konstruuje się wtedy pływające obiekty z takim systemem. Niestety, istnieją zagrożenia i przeszkody w sprawnym działaniu konstrukcji. Przykładem mogą być kable połączone do pływających platform. Są one bardziej podatne na uszkodzenia, zwłaszcza podczas burz. Liny i rury na głębokościach większych niż 1000 metrów są trudne do utrzymania i naprawy oraz kosztowne w konserwacji. Jednak w niektórych przypadkach rozwiązanie to jest bardziej opłacalne niż w pozostałych wcześniej wymienionych.



Schemat pływającej konstrukcji z systemem OTEC

9. WADY SYSTEMU

Pomimo tych istniejących i planowanych elektrowni OTEC oraz kuszących perspektyw, wykorzystanie energii cieplnej oceanów do produkcji elektryczności znajduje się w początkowym stadium rozwoju i prawdopodobnie upłynie jeszcze trochę czasu, nim ta technologia zostanie bardziej rozpowszechniona. Główne tego przyczyny związane są z kosztami i trudnościami opracowania ekonomicznie opłacalnych rozwiązań. Sprawność energetyczna konwersji energii cieplnej oceanów w elektryczną jest rzędu kilku procent. Wynika to głównie z tego, że pompowanie wody zimnej z dużej głębokości ok. 1 km zużywa dużą część (ok. 70/80%) wyprodukowanej energii elektrycznej. Trudność tę próbuje się rozwiązać przez odsalanie morskiej wody. Odsolona woda ma niższy ciężar właściwy od wody słonej i sama wypływa na powierzchnię. Dodatkowe trudności napotyka się przy stosowaniu długich, sięgających jednego kilometra rur, pobierających z głębokości zimną wodę. Woda morska jest bardzo korozyjna, tak że dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych jest ważnym elementem. Najbardziej wytrzymałymi i nadającymi się do konstrukcji takich aparatów są tytan oraz kewlar. Jednak wadą obu jest wysoka cena. Prowadzone są próby zastąpienia go aluminium lub jego stopami. Stosowane rozwiązania powinny wykazywać się wysoką sprawnością, co już udało się osiągnąć przy konstrukcji wyparek. Dodatkowym problemem jest osadzanie się różnych wodorostów oraz bakterii w rurociągach i aparatach. Ponadto pływające elektrownie, jak i również podwodne rury, muszą być zaprojektowane na ekstremalne warunki atmosferyczne. Wszystkie trudności muszą zostać rozwiązane, zanim nastąpi wykorzystanie OTEC na szeroką skalę.

9. PODSUMOWANIE

Energia maretermiczna powoli zyskuje na opłacalności i tym samym staje się realną wizją energetyki jutra. Wyczerpujące się zasoby naturalne pewnego dnia zmuszą nas do sięgnięcia po OTEC na większą skalę. Ubogie kraje strefy międzyzwrotnikowej, których nie stać na energetykę jądrową, prawdopodobnie chętnie przejmą inicjatywę i zaczną budować elektrownie tego typu, uniezależniając się energetycznie od większych państw. Nawet jeśli sprawność tych systemów to tylko kilka procent, przy większych inwestycjach można uzyskać dosyć duże ilości energii (samo źródło jest praktycznie niewyczerpalne). Energia maretermiczna jest bezpieczna w produkcji i eksploatacji. Nie wydziela żadnych szkodliwych odpadów ani nie zniekształca krajobrazu kominami czy innymi wysokimi konstrukcjami (np. wiatrakami). Wydaje się być wprost idealna dla tych miejsc, z których można ją pozyskać. Jedyne problemy to obecna technologia. Jednak odpowiednie dotacje na badania sprawią, że szybciej osiągniemy wyższą opłacalność tego typu przedsięwzięć i system OTEC stanie się równie popularny jak energetyka wiatrowa czy fotowoltaiczna. Powoli zaczynamy uczyć się wykorzystywać energetycznie naszą planetę, tym samym jej nie szkodząc.

LITERATURA

- [1] J. Taubman, *Węgiel i alternatywne źródła energii. Prognozy na przyszłość* (2013)
- [2] S. Gumuła, J. Chojnacki, T. Knap, P. Tomczyk, *Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii*
- [3] (2008)
- [4] *A Guide To OTEC*, William H. Avery, Chih Wu , *Renewable Energy From The Ocean* (1994)
- [5] D. Kreith, F. Schlepp, W. Owens (1984), *Heat and Mass Transfer in Open-Cycle OTEC Systems*
- [6] www.energiaodnawiana.net www.otecnews.org