

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 61, 2013: 336–347
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 61, 2013)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 61, 2013: 336–347
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 61, 2013)

Ewa PAPIEROWSKA

Laboratorium Centrum Wodne, SGGW w Warszawie
Water Centre Laboratory, WULS – SGGW

Maciej CHACZYKOWSKI

Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Politechnika Warszawska
District Heating and Natural Gas Systems Division, Warsaw University of Technology

Wykorzystanie technologii ORC w celu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych

Review of ORC systems for electricity generation from renewable energy sources

Słowa kluczowe: organiczny obieg Rankine’a, odnawialne źródła energii, organiczne czynniki robocze

Key words: organic Rankine cycle, renewable energy sources, organic working fluids

Wprowadzenie

W przyjętym przez Radę Ministrów w dniu 10 listopada 2009 roku dokumencie „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” Polska zobligowała się dostosować do postawionych przez Unię Europejską zobowiązań ekologicznych, w tym do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii o 20% w stosunku do całkowitego zużycia energii w UE (Polityka energetyczna... 2009). W 2009 roku w Polsce udział odnawialnych źró-

deł energii w energii pierwotnej ogółem wynosił zaledwie niecałe 10% (Energia ze źródeł... 2011).

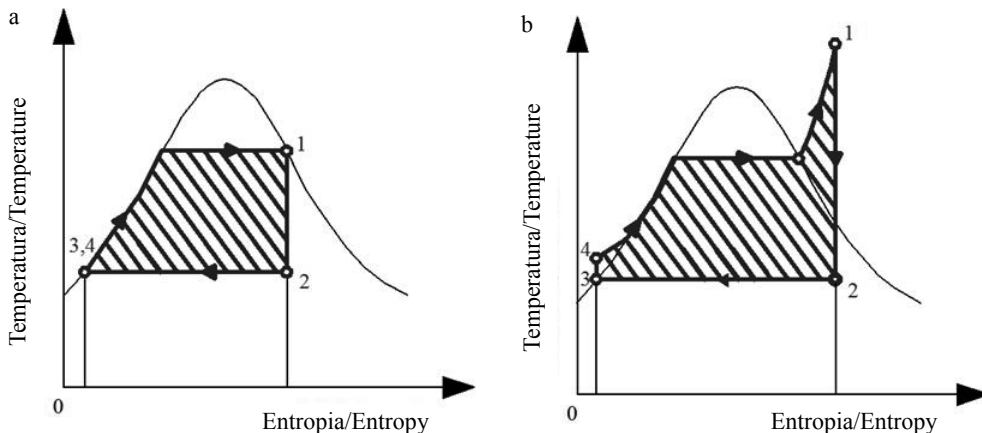
Instalacje ORC stanowią rozwiązanie umożliwiające wykorzystanie do produkcji energii elektrycznej odnawialnych źródeł energii, takich jak: wody geotermalne, biomasa, instalacje solarne i biogaz. Instalacje te opierają się na obiegu Clausiusa-Rankine’a. Obieg ten jest modelem siłowni parowej, siłowni jądrowej, jak również może służyć do opisu siłowni na inne czynniki parowe (oprócz pary wodnej), którymi mogą być tzw. czynniki niskowrzące (oleje syntetyczne, freony, węglowodory itd.), zwane też organicznymi. To właśnie obieg na tego typu czynniki organiczne powszechnie określany jest symbolem ORC (organic

Rankine cycle) – Lewandowski i inni (2010). Ze względu na niekorzystne właściwości wody, jako czynnika roboczego w przypadku instalacji zasilanych ciepłem o małych wartościach parametrów, już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku poszukiwano innych czynników niskowrzących pod kątem realizacji obiegu binarnego i zagospodarowania ciepła odpadowego nisko- i średniotemperaturowego (Kubski i in. 2010). Obieg Rankine’a składa się z kilku procesów (rys. 1): rozprężania izentropowego pary nasyconej mokrej (1-2), izobarycznego skraplania (2-3), sprężania cieczy (3-4) oraz izobarycznego podgrzewania i parowania (4-1). W układzie $T-s$ (temperatura – entropia) stan cieczy przed sprężeniem i po sprężeniu praktycznie pokrywa się ze sobą (punkty 3 i 4), ponieważ sprężenie cieczy wywołuje znikomy przyrost temperatury. W rzeczywistej siłowni parowej rozprężanie adiabatyczne przebiega nieodwracalnie,

a podczas przepływu czynnika obiegowego przez wymiennik ciepła występuje strata ciśnienia. W związku z trudnościami izotermicznego rozprężania pary wodnej w temperaturze wyższej od krytycznej kocioł siłowni zaopatruje się w przegrzewacz. Obieg Rankine’a dla pary przegrzanej przedstawiono na rysunku 1b (Szargut 1991).

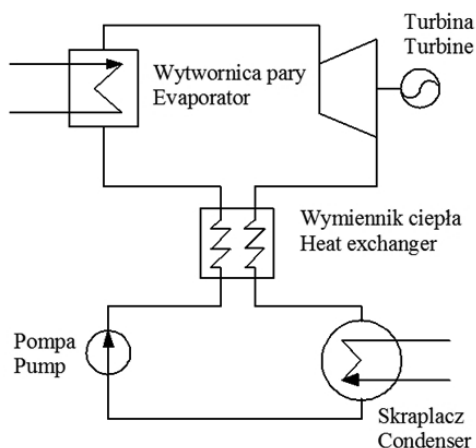
Na rysunku 2 przedstawiono obieg ORC z wewnętrzną regeneracją, polegającą na przekazaniu ciepła przez opuszczający turbinę w stanie pary przegrzanej czynnik parowy do cieczy, która powstaje w wyniku późniejszego skraplania tej pary w skraplaczu. Wykazano, że takie rozwiązanie może przyczynić się do wzrostu sprawności instalacji i najczęściej stosuje się je dla czynników suchych (Lewandowski i in. 2010).

Odmianą technologią niż organiczny obieg Rankine’a jest obieg Kaliny. Obieg ten bazuje na obiegu Clausiusa-Rankine’a, ale różni się dodatkowym



RYСУNEK 1. Obieg Clausiusa-Rankine’a w układzie współrzędnych termodynamicznych Belpaire’a (bezwzględna temperatura – entropia właściwa): a – dla pary nasyconej mokrej, b – dla pary przegrzanej (Szargut 1991)

FIGURE 1. The Clausius-Rankine cycle in thermodynamic Belpaire system of coordinates (absolute temperature – entropy): a – for wet saturated steam, b – for superheated steam (Szargut 1991)



RYSUNEK 2. Obieg ORC z regeneracją wewnętrzną (Dai i in. 2009, Lewandowski i in. 2010)

FIGURE 2. The ORC system with internal heat exchanger (Dai et al. 2009, Lewandowski et al. 2010)

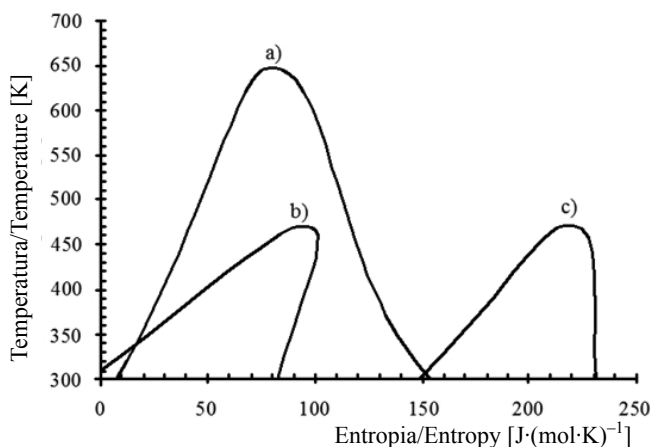
członem destylacyjnym oraz mieszaniną amoniakalno-wodną jako czynnikami roboczymi. Temperatura źródła ciepła nie przekracza z reguły 200°C, ale – w odróżnieniu od standardowego obiegu

ORC – obieg Kaliny charakteryzuje się wyższą sprawnością, co jest wynikiem wzrostu temperatury mieszaniny podczas jej wrzenia (Mazurek i Valdimarsson 2011).

Wybór czynnika roboczego

Wybór odpowiedniego czynnika roboczego odgrywa znaczącą rolę przy zastosowaniu obiegu ORC, między innymi ze względu na osiągnięcie wysokiej efektywności konwersji energii (Chaczykowski 2012). Wśród czynników organicznych realizujących obieg Clausiusa-Rankine’a można wyróżnić trzy główne typy: czynnik mokry, czynnik suchy oraz izentropowy, w zależności od nachylenia krzywej nasycenia pary na wykresie T-s (rys. 3).

Wartość dT/ds dąży do nieskończoności dla cieczy izentropowej. Z kolei odwrotność nachylenia $\xi = ds/dT$



RYSUNEK 3. Trzy typy czynników organicznych w układzie T-s (temperatura – entropia): a – czynnik mokry – woda, b – czynnik suchy – pentan, c – czynnik izentropowy – R11 (Chen i in. 2010)

FIGURE 3. Three types of organic working medium in thermodynamic Belpaire system of coordinates T-s (temperature – entropy): a – wet fluid – pentane, b – dry fluid – pentane, c – isentropic fluid – R11 (Chen et al. 2010)

wyraża, w jakim stopniu czynnik roboczy jest „suchy” czy „mokry”. Odwrotność nachylenia ξ jest więc wskaźnikiem określającym rodzaj czynnika roboczego. W przypadku gdy $\xi < 0$, czynnik jest określany jako „mokry”, gdy $\xi > 0$ czynnik jest „suchy”, a w przypadku gdy $\xi \approx 0$, mamy do czynienia z czynnikiem izentropowym (Chen i in. 2010). Liu i inni (2004) do obliczenia wartości wskaźnika ξ zaproponowali równanie:

$$\xi = \frac{C_p}{T_H} - \frac{((n \cdot T_{rH}) / (1 - T_{rH})) + 1}{T_H^2} \cdot \Delta H_H$$

[J · (kg · K²)⁻¹] (1)

gdzie:

C_p – pojemność cieplna [J·kg⁻¹],
 T_H – temperatura parowania [K],

n – stała wartość wynosząca 0,375 lub 0,38,

$T_{rH} = T_H/T_C$ zredukowana temperatura dla procesu parowania [–],

T_c – temperatura krytyczna [K],

ΔH_H – entalpia pary [J·kg⁻¹].

Wyniki obliczeń wskaźnika ξ z określeniem typu czynnika dla podstawowych cieczy roboczych, otrzymane z równania (1), przedstawiono w tabeli 1.

Wybór czynnika jest determinowany zastosowaniem obiegu ORC oraz temperaturą dostępnego źródła ciepła (Borsukiewicz-Gozdur i Nowak 2007). Czynnik roboczy powinien być tani, by nie generować wysokich kosztów dla elektrowni, oraz „przyjazny” dla środowiska (Saleh i in. 2007). W tabeli 2 porównano właściwości wody stosowanej przy siłowni parowej i czynnika organicznego

TABELA 1. Rodzaje czynników roboczych^a (Liu i in. 2004)

TABLE 1. Types of working fluids (Liu et al. 2004)

Czynniki robocze Working fluids	ξ [J·(kg·K ²) ⁻¹]	Typ czynnika Type
Woda / Water	-13,1818	mokry / wet
Etanol / Ethanol	-5,4299	mokry / wet
R11 ^b	-0,3903	izentropowy / isentropic
R123 ^c	0,1202	izentropowy / isentropic
HFE7100 ^d	1,8252	suchy / dry
n-pentan / n-Pentane	1,2835	suchy / dry
Izo-pentan (2-metylobutan) / Iso-pentane	1,1801	suchy / dry
Benzen / Benzene	0,3316	izentropowy / isentropic
Toluen / Toluene	1,0600	suchy / dry
Para ksylen / p-Xylen	1,5390	suchy / dry

^a Wyniki analizy dla krzywej pary nasyconej w przypadku T_H równej temperaturze wrzenia w warunkach normalnych / The results are analyzed at the saturated vapor curve for the case T_H = normal boiling point,

^b R11: CCl₃F,

^c R123: CHCl₂-CF₃,

^d HFE7100: C₄F₉OCH₃.

TABELA 2. Porównanie czynników roboczych stosowanych w obiegu parowym i organicznym obiegu Rankine'a (Tchanche i in. 2011)

TABLE 2. Comparison of working-fluid properties in steam and organic Rankine cycles (Tchanche et al. 2011)

Właściwości Properties	Obieg parowy Steam cycle	Organiczny obieg Rankine'a Organic Rankine cycle
Czynnik roboczy Working fluid	woda water	związek organiczny organic compound
Ciśnienie krytyczne Critical pressure	wysokie high	niskie low
Temperatura krytyczna Critical temperature	wysoka high	niska low
Temperatura wrzenia Boiling point	wysoka high	niska low
Ciśnienie skraplania Condensing pressure	niskie low	akceptowalne acceptable
Pojemność cieplna Specific heat	wysoka high	niska low
Lepkość Viscosity	niska low	stosunkowo wysoka relatively high
Palność Flammability	nie no	tak, zależna od cieczy yes, and depends on fluid
Toksyczność Toxicity	nie no	tak yes
Wpływ na środowisko Environmental impact	nie no	duży, zależny od cieczy yes, and depends on fluid
Dostępność Availability	dostępne available	problem z pozyskaniem supply problem
Koszt Cost	niski cheap	wysoki expensive

stosowanego w instalacjach opartych na organicznym obiegu Rankine'a.

Wybór odpowiedniej cieczy organicznej do obiegu ORC jest stale tematem badań termodynamicznych i fizycznych z uwagi na następujące pożądane cechy tych cieczy: niską temperaturę krytyczną i ciśnienie, małą lepkość i napięcie powierzchniowe, dużą przewodność cieplną, odpowiednią stabilność termiczną, odporność na korozję oraz małą toksyczność. Ponadto czynniki ro-

bocze nie powinny być żrące w stosunku do materiałów i smarów używanych w instalacjach (Maizza i Maizza 2001). Według Mago i innych (2008) do najważniejszych cech dobrego czynnika roboczego należą: mała toksyczność, kompatybilność i stabilność chemiczna podczas pracy z różnymi materiałami, niska palność, korozyjność i mały potencjał rozkładu. Do jednych z najlepszych czynników roboczych należą czynniki chłodnicze, których oznaczenia według

Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) zaczynają się na literę R (od słowa refrigerant), na przykład R-123. Jednakże ze względu na ochronę środowiska niektóre czynniki robocze zostały wycofane z użycia, na przykład R-11, R-12, R-113, R-114 i R-115. Część z nich jest w użyciu tylko do 2020 roku bądź do 2030 roku, na przykład R-21, R-22, R-123, R-124, R-141b i R-142b (Chen i in. 2010).

Z uwagi na to, że nie istnieje idealny czynnik chłodniczy, który charakteryzowałby się dobrymi właściwościami termodynamicznymi, był bezpieczny dla ludzi oraz środowiska oraz nie powodowałby korozji, naukowcy wciąż poszukują nowych czynników roboczych spełniających w najwyższym stopniu wcześniej wymienione wymagania.

Obecnie do oceny związków chemicznych z punktu widzenia ich wpływu na środowisko stosuje się dwa wskaźniki: ODP (Ozone Depletion Potential) oraz GWP (Global Warming Potential) – Gutkowski i Butrymowicz (2007), Rubik (2011), Nowak i Borsukiewicz-Gozdur (2011).

W ostatnich latach coraz częściej stosuje się procedurę doboru czynnika roboczego na podstawie wspomaganego komputerowo projektowania molekularnego. To nowatorskie podejście przypisuje czynnikom roboczym miary w czterech podstawowych kategoriach związanych z termodynamiką, środowiskiem, bezpieczeństwem oraz procesem (Papadopoulos i in. 2010).

Przegląd dostępnych instalacji

Pierwsza elektrownia ORC powstała w 1967 roku w miejscowości Paratunka na Kamczatce, we wschodniej Syberii, jako instalacja eksperymentalna, i miała moc 680 kWe. Zasilana była wodą o temperaturze 81°C i wykorzystywała czynnik roboczy R-12 (dichlorodifluorometan – najczęściej stosowany freon o wzorze CCl_2F_2 i o nazwie handlowej Freon-12). Od tego czasu zainstalowano na całym świecie instalacje z obiegiem ORC zarówno jako instalacje pilotażowe, jak i instalacje komercyjne. W latach osiemdziesiątych prace nad ORC zostały wstrzymane z powodu stosowanych jako czynniki robocze węglowodorów fluorochlorowych, powodujących niszczenie warstwy ozonowej. Obecnie wraz z zastosowaniem nowych czynników roboczych zainteresowanie obiegiem ORC wzrosło (Badyda 2008).

Obieg ORC jest obiecującym procesem konwersji ciepła nisko- i średniotemperaturowego, pochodzącego ze źródeł odnawialnych, w energię elektryczną. W tabeli 3 zebrano przykłady zastosowań siłowni ORC przedstawiane w literaturze.

Zarówno w przypadku organicznego obiegu Rankine'a, jak i obiegu Kaliny woda geotermalna wydobywana przez otwór produkcyjny oddaje ciepło w parowniku (wymyenniku ciepła) czynnikowi roboczemu o znacznie niższej, niż woda geotermalna, temperaturze wrzenia. Pary czynnika roboczego skierowane zostają na turbinę połączoną z generatorem i następuje zamiana energii strumienia czynnika roboczego na energię mechaniczną ruchu obrotowego łopatek wirnika, co pozwala na produkcję

TABELA 3. Instalacje mogące współpracować z obiegiem ORC

TABLE 3. Applications of ORC systems

Instalacje Systems	Źródło literaturowe References
Elektrownie słoneczne Solar power plants	Rayegan i Tao 2011
Układy kogeneracyjne małej skali Small cogeneration (CHP) systems	Facão i Oliveira 2009
Instalacje odsalania wody Water desalination systems	Garcia-Rodriguez i Delgado-Torres 2007 Delgado-Torres i Garcia-Rodriguez 2010
Instalacje wykorzystujące ciepło odpadowe silników spalinowych Installations using the waste heat of combustion engines	Vaja i Gambarotta 2010
Instalacje geotermalne Geothermal installations	Saleh i in. 2007
Siłownie parowe Steam-electric power station	Mohamed i in. 2010
Biogaz Biogas	Schuster i in. 2009
Ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem SOFC Solid oxide fuel cell	Akkaya i Sahin 2009

energii elektrycznej. Następnie czynnik roboczy jest skraplany w skraplaczu i kierowany do parownika, gdzie cykl się ponownie rozpoczyna (Kaczmarczyk 2011).

Jako pierwszy w Polsce zakład ciepłowniczy w Ostrowie Wielkopolskim wybudował blok kogeneracyjny opalany biomasą z wykorzystaniem instalacji ORC. Projekt ten polegał na likwidacji jednego spośród pięciu kotłów węglowych i wybudowaniu w tym miejscu nowoczesnego bloku kogeneracyjnego opalanego biomasą z turbogeneratorem ORC. Zastosowano jeden kocioł z obiegiem oleju termalnego o mocy cieplnej 9 MWt opalany odpadami drzewnymi. Kocioł zasila turbogenerator ORC produkujący energię cieplną dla celów grzewczych oraz energię elektryczną

(<http://www.ozc.ostrow-wielkopolski.pl/index.php?show=historia>). Celowość stosowania układów ORC do współpracy ze źródłami opalonymi biomasą wynika z faktu, że z powodu stosunkowo dużej zawartości wilgoci w biomasie, która może wynosić nawet powyżej 50%, bardzo trudno jest uzyskać wysoką temperaturę spalania. Obecnie budowane instalacje ORC, oparte na kotle opalonym biomasą, realizowane są dla mocy od 400 do 1500 kWe, a sprawności uzyskiwane są z zakresu 10–20% (Badyda 2008).

Obecnie na świecie działa 75 elektrowni geotermalnych opartych na organicznym obiegu Rankine'a (ORC), w tym tylko w trzech wykorzystano obieg Kaliny, tj. w Husaviku na Islandii oraz Unterhaching i Bruchsak w Niemczech. Stany Zjednoczone posiadają najwięcej,

bo aż 37 instalacji. Polska dysponuje znacznym potencjałem geotermalnym, występującym równomiernie na terenie kraju. Szacuje się, że całkowita wielkość zasobów wynosi około 6600 km³, w tym głównie źródła niskiej i średniej entalpii, co odpowiada temperaturze wody w granicach 25–150°C. Najdogodniejsze warunki geotermalne występują na Nizinie Polskiej, Podhalu oraz w Sudetach (Nowak i in. 2010).

Według Rayegan i Tao (2011) promieniowanie słoneczne w porównaniu z innymi odnawialnymi źródłami energii ma ogromną pojemność i jest właściwie niewyczerpywane. Jednakże w chwili obecnej, z uwagi na wysokie koszty, elektrownie słoneczne nie mogą konkurować z instalacjami konwencjonalnymi. Koszty te mogą być zredukowane poprzez zwiększenie wydajności systemów, które mogą być osiągnięte przez odpowiedni dobór czynnika roboczego oraz warunków pracy.

Modułowe instalacje solarne oparte na organicznym obiegu Rankine'a działają na tej samej zasadzie jak w przypadku kolektorów rurowych ze zwierciadłami parabolicznymi. Są to instalacje, które mają wiele zalet, do których należą (Tchanche i in. 2011):

- praca w niskiej temperaturze, poniżej 300°C, a co za tym idzie – niska temperatura kolektorów i instalacji ORC, które mogą działać również w regionach o małej intensywności promieniowania słonecznego,
- modułowość, połączenie w jednym miejscu wielu modułów ORC pozwala na stworzenie dużych elektrowni słonecznych o mocy rzędu kilku MW,
- małe nakłady kapitałowe z uwagi na wykorzystanie tanich materia-

łów, tani nośnik ciepła, tanie kolektory słoneczne, stosunkowo tanie instalacje ORC i zdalną obsługę, co ogranicza liczbę operatorów oraz skraplacze chłodzone powietrzem oszczędzające zasoby wody.

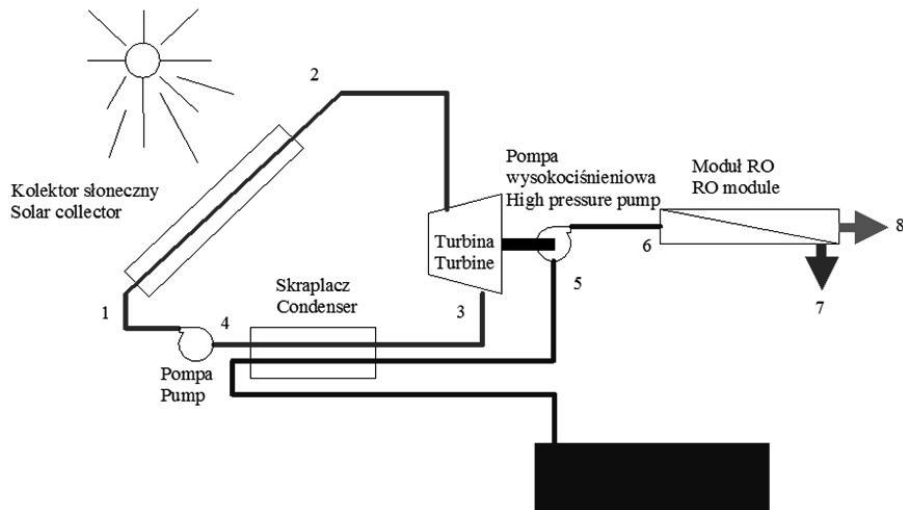
Innym przykładem zastosowania organicznego obiegu Rankine'a przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego są stawy „słoneczne” (SPPP – solar pond power plant). Promieniowanie słoneczne jest kumulowane w zbiorniku wodnym o dużym stężeniu soli. Instalacja połączona jest z organicznym obiegiem Rankine'a. Staw jest sztucznie podzielony na trzy strefy. Górna warstwa powierzchniowa, o grubości 0,15–0,3 m i małym zasoleniu, działa jako przezroczysta pokrywa i termiczny izolator. Warstwa środkowa (przejściowa), o grubości 1–1,5 m, służy jako dodatkowy izolator. W warstwie tej następuje wzrost zasolenia i temperatury wraz ze zwiększaniem się głębokości. Dolna warstwa, o grubości 2–7 m z dużą koncentracją soli, działa jako pochłaniacz i magazyn energii cieplnej (Tchanche i in. 2011). Na rysunku 4 przedstawiono staw „słoneczny” Pyramin Hill, zbudowany w Australii, o powierzchni 3000 m².

Według Garcia-Rodriguez i Delgado-Torres (2007) rozproszona energia pochodząca z promieniowania słonecznego może być wykorzystana w różnych celach, nie tylko do wytwarzania energii elektrycznej, ale również do odsalania wody, chłodzenia, ogrzewania itp. W swojej pracy skupili się oni na wykorzystaniu systemów solarnych z organicznym cyklem Rankine'a do odsalania wody w procesie odwróconej osmozy. Schemat systemu przedstawiono na rysunku 5.



RYSUNEK 4. Staw słoneczny Pyramid Hill, Australia (Leblanc i in. 2011)

FIGURE 4. Pyramid Hill solar pond, Australia (Leblanc et al. 2011)



RYSUNEK 5. Podstawowy schemat odwróconej osmozy napędzanej energią słoneczną z organicznym obiegiem Rankine'a: 1 – wprowadzenie czynnika roboczego, 2 – czynnik roboczy na wyjściu kolektora, 3 – para czynnika roboczego na wyjściu turbiny, 4 – kondensat czynnika roboczego, 5, 6 – woda zasilająca (słona), 7 – solanka, 8 – produkt końcowy (czysta woda), RO – moduł odwróconej osmozy (Garcia-Rodriguez i Delgado-Torres 2007)

FIGURE 5. Basic diagram of a reverse osmosis system powered by a solar-heated Rankine cycle: 1 – working fluid entering the solar field, 2 – working fluid at its maximum temperature and pressure (steam), 3 – expanded steam, 4 – condensed working fluid, 5, 6 – feedwater (brackish water or seawater), 7 – brine, 8 – product, RO – reverse osmosis module (Garcia-Rodriguez and Delgado-Torres 2007)

Według autorów takie systemy są obiecującą perspektywą, zwłaszcza na obszarach wiejskich, gdzie brak dostępu do

sieci elektroenergetycznej i słodkiej wody ogranicza rozwój i jakość życia (Garcia-Rodriguez i Delgado-Torres 2007).

Podsumowanie i wnioski

Rosnący udział odnawialnych źródeł energii powoduje, że znane od lat sześćdziesiątych XX wieku instalacje oparte na organicznym obiegu Rankine'a nabierają coraz większego znaczenia. Naukowcy poszukują nowych rozwiązań technologicznych i czynników roboczych, spełniających kryteria postawione z jednej strony przez technologię (wzrost wydajności procesów), z drugiej strony kryteria mające na uwadze ochronę środowiska oraz bezpieczeństwo ludzi. Zwiększenie zapotrzebowania na energię, przy rosnących cenach surowców kopalnych i uzależnieniu od zewnętrznych dostawców, powoduje wzrost zainteresowania nowymi możliwościami wytwarzania energii elektrycznej, w tym instalacjami ORC. Projektowanie instalacji ORC jest zależne od dostępnego źródła energii (ciepła). Im większa wartość temperatury strumienia ciepła, tym wyższa sprawność konwersji w energię elektryczną. W chwili obecnej instalacje ORC charakteryzują się na tyle wysokimi nakładami inwestycyjnymi, że nie są w stanie konkurować pod względem ekonomicznym z konwencjonalnymi metodami wytwarzania energii. Sytuację tę można poprawić przez wykorzystywanie ciepła odpadowego oraz poszukiwanie nowych czynników roboczych poprawiających sprawność procesów konwersji energii, a także budowę rozproszonych systemów energetycznych, pozwalających na redukcję kosztów infrastruktury przesyłowej. Przewiduje się obniżenie kosztów instalacji ORC w momencie wejścia do masowej produkcji. Wraz z rozwojem technologii pojawiają

się nowe możliwości wykorzystania instalacji ORC. Obecnie trwają intensywne badania nad poprawą sprawności procesów odsalania wody metodą odwróconej osmozy czy zwiększeniem efektywności wytwarzania energii w ogniwach paliwowych dzięki zastosowaniu układów kombinowanych z organicznym obiegiem Rankine'a.

Literatura

- AKKAYA A.V., SAHIN B. 2009: A study on performance of solid oxide fuel cell-organic Rankine cycle combined system. *Int. J. Energy Res.* 33: 553–564.
- BADYDA K. 2008: Biomasa jako paliwo w małych elektrociepłowniach. *Czysta Energia* 01/2008. Stowarzyszenie Energii Odnawialnej (http://www.seo.org.pl/f_publicacje_r.php?id_publicacji=17&id_c=4, dostęp: 13.11.2012 r.).
- BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., NOWAK W. 2007: Maximising the working fluid flow as a way of increasing power output of geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering* 27: 2074–2078.
- CHACZYKOWSKI M. 2012: Procesy cieplne w stacji przetłoczonej zwiększające efektywność transportu gazu. *Inżynieria Środowiska* 60: 1–85.
- CHEN H., GOSWAMI D.Y., STEFANAKOS E.K. 2010: A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 3059–3067.
- DAI Y., WANG J., GAO L. 2009: Parametric optimization and comparative study of Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Convers. and Manag.* 50 (3): 576–582.
- DELGADO-TORRES A.M., GARCIA-RODRIGUEZ L. 2010: Preliminary design of seawater and brackish water reverse osmosis desalination systems driven by low-temperature solar organic Rankine cycles (ORC). *Energy Convers. and Manag.* 51: 2913–2920.

- Energia ze źródeł odnawialnych w 2010 r., 2011., Informacje i opracowania statystyczne. GUS, Warszawa (www.stat.gov.pl, dostęp: 20.11.2012 r.).
- FACÃO J., OLIVEIRA A.C. 2009: Analysis of Energetic, Design and Operational Criteria When Choosing an Adequate Working Fluid for Small Orc Systems. Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2009, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- GARCIA-RODRIGUEZ L., DELGADO-TORRES A.M. 2007: Solar-powered Rankine cycles for fresh water production. *Desalination* 212: 319–327.
- GUTKOWSKI K.M., BUTRYMOWICZ D.J. 2007: Chłodnictwo i klimatyzacja. WNT, Warszawa.
- KACZMARCZYK M., 2011: Wykorzystanie energii geotermalnej do produkcji prądu elektrycznego z zastosowaniem obiegu organicznego Rankine'a lub cyklu Kaliny – przegląd instalacji działających na świecie. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 1–2: 131–144.
- KUBSKI P., LEWANDOWSKI W.M., RYMS M. 2010: Zwiększenie sprawności procesów technologicznych poprzez zastosowanie układów ORC i systemów trigeneracyjnych. *Nafta – Gaz* 10: 886–891.
- LEBLANC J., AKBARZADEHA., ANDREWS J., LU H., GOLDING P. 2011: Heat extraction methods from salinity-gradient solar ponds and introduction of a novel system of heat extraction for improved efficiency. *Solar Energy* 85: 3103–3142.
- LEWANDOWSKI W.M., RYMS M., KOŁOŁA R., KUBSKI P. 2010: Poprawa sprawności układów ORC i systemów trigeneracyjnych poprzez zastosowanie różnych termodynamicznych wariantów ich działania. *Nafta – Gaz* 9: 794–799.
- LIU B., CHIEN K., WANG C. 2004: Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy* 2: 1207–1217.
- MAGO P.J., CHAMRA L.M., SRINIVASAN K., SOMAYAJI C. 2008: An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Applied Thermal Engineering* 28: 998–1007.
- MAIZZA V., MAIZZA A. 2001: Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering* 21: 381–390.
- MAZUREK R., VALDIMARSSON P. 2011: Wpływ temperatury wody geotermalnej o niskiej i średniej entalpii na pracę elektrowni z obiegiem Kaliny w warunkach polskich. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 1–2: 177–187.
- MOHAMED K.M., BETTLE M.C., GERBER A.G., HALL J.W. 2010: Optimization study of large-scale low-grade energy recovery from conventional Rankine cycle power plants. *Int. J. Energy Res.* 34: 1071–1087.
- NOWAK W., BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., 2011: Siłownie ORC sposobem na wykorzystanie energii ze źródeł niskotemperaturowych. *Czysta Energia* 2: 32–35.
- NOWAK W., BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., KLONOWICZ P., STACHEL A.A., HANAUSEK P., KLONOWICZ W. 2010: Wstępne wyniki badań prototypowego układu mini siłowni z ORC zasilanej wodą o temperaturze 100°C. *Przegląd Geologiczny* 58, 7: 622–625.
- PAPADOPOULOS A.I., STIJEPOVIC M., LINKE P. 2010: On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering* 30: 760–769.
- Polityka energetyczna Polski do roku 2030, 2009. Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dnia 10 listopada 2009 roku. (<http://www.mg.gov.pl/Bezpieczenstwo+gospodarcze/Energetyka/Polityka+energetyczna>, dostęp 8.01.2013 r.).
- RAYEGAN R., TAO Y.X. 2011: A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). *Renewable Energy* 36: 659–670.
- RUBIK M. 2011: Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej. Oficyna Wydawnicza MULTICO, Warszawa.
- SALEH B., KOGLBAUER G, WENDLAND M., FISCHER J. 2007: Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy* 32: 1210–1221.

- SCHUSTER A., KARELLAS S., KAKARAS E., SPLIETHOFF H. 2009: Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering* 29: 1809–1817.
- SZARGUT J. 1991: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- TCHANCHE B.F., LAMBRINOS G., FRANGOUDAKIS A., PAPADAKIS G. 2011: Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3963–3979.
- VAJA I., GAMBAROTTA A. 2010: Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy* 35: 1084–1093.

Streszczenie

Wykorzystanie technologii ORC w celu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii odgrywa znaczącą rolę w polityce energetycznej kraju przede wszystkim w realizacji postawionych przez Unię Europejską zobowiązań ekologicznych. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania technologii ORC, opartej na organicznym obiegu Rankine’a, w celu poprawy sprawności procesu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, takich jak: instalacje solarne, biomasa oraz wody geotermalne. Przedstawiono również problem doboru odpowiedniego czynnika roboczego, który zależy od konkretnej aplikacji oraz od dostępnego źródła ciepła.

Summary

Review of ORC systems for electricity generation from renewable energy sources. The use of renewable energy sources is one of the country’s energy policy targets, especially from the viewpoint of the implementation of the European Commission RES Directive. In this paper a review of the possibilities of using the organic-Rankine-cycle technology for power generation from renewable sources, such as solar energy, biomass and geothermal water is presented. It also discusses the problem of the selection of a suitable organic working fluid, which depends on the particular application of the ORC system and the available heat source.

Authors’ addresses:

Ewa Papierowska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Laboratorium Centrum Wodne
ul. Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: ewa_papierowska@sggw.pl

Maciej Chaczykowski
Politechnika Warszawska
Zakład Systemów Ciepłowniczych
i Gazowniczych
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa
Poland
e-mail: maciej.chaczykowski@is.pw.edu.pl