

RAFAŁ PAŹIK, TOMASZ KRASOWSKI, ZYGMUNT LIPNICKI*

**ANALIZA WSPÓŁPRACY ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ CIEPŁA
Z OBIEGIEM SILNIKA CIEPLNEGO WYKORZYSTUJĄCYCH
NISKOWRZĄCE CZYNNIKI TERMODYNAMICZNE**

Streszczenie

W pracy poddano analizie silniki cieplne realizujące obiegi termodynamiczne ORC, wykorzystujące niskowrzące czynniki termodynamiczne. Z przeprowadzonej analizy wynika, że wykorzystywanie w praktyce tego typu silników jest opłacalne w przypadku pobierania taniego lub darmowego ciepła z górnego źródła ciepła.

Słowa kluczowe: organiczny obieg Rankine'a, czynnik organiczny

Wstęp

Wyczerpywanie się zasobów energii nieodnawialnej i ochrona środowiska naturalnego staje się koniecznością poszukiwania tanich i przyjaznych środowisku naturalnemu źródeł energii. Interesujące wydaje się wytwarzanie prądu elektrycznego z zasobów niskotemperaturowej energii odnawialnej: ciepło pobierane z gruntu, ciepło z kolektorów słonecznych i technologiczne ciepło odpadowe, jako elementu energetyki rozproszonej. W szczególnych przypadkach można transformować ją w prąd elektryczny, jeżeli czynnikiem termodynamicznym w obiegu siłowni parowej (elektrowni niskotemperaturowej) jest czynnik organiczny niskowrzący. Właściwości wymienionego czynnika stwarzają warunki do realizacji zmodyfikowanego obiegu Rankine'a nazywanego w literaturze naukowej Organic Rankine Cycle-ORC. Nad badaniem i doskonaleniem tego typu obiegów termodynamicznych prowadzonych jest ostatnio wiele badań. Duże osiągnięcia w tej dziedzinie ma amerykański instytut Ormat Technologies [Bronicki 2008], który zaprojektował i zbudował około 30 elektrowni geotermalnych o mocy od 200 kW do 130 MW o łącznej mocy ok. 1000 MW.

* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Sieci i Instalacji Sanitarnych

W Polsce badania teoretyczne i eksperymentalne nad mikrośilownikami pracującymi według obiegu ORC prowadzą wspólnie Katedra Techniki Ciepłej Politechniki Gdańskiej i Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku [Mikielewicz 2008, Wajs 2009]. W badaniach tych przebadano wiele czynników organicznych i oceniono ich przydatność do realizacji obiegu siłowni parowej wytwarzającej prąd elektryczny.

Niskie temperatury źródła ciepła nie pozwalają na osiągnięcie wysokich temperatur w obiegu parowym, a więc są główną przyczyną względnie niskiej sprawności termodynamicznej obiegów cieplnych. Warunkiem stosowania tego typu urządzeń cieplnych jest dostępność do taniego ciepła. Propozycję tego typu niskotemperaturowej elektrowni geotermalnej przedstawiono w pracy [Lipnicki 2008]. Natomiast zjawisko przepływu ciepła w odwiercie geotermalnym i jego otoczeniu omówiono na podstawie innych badań i poddano analizie teoretycznej w publikacji [Pająk 2000, Lipnicki, Pązik 2008].

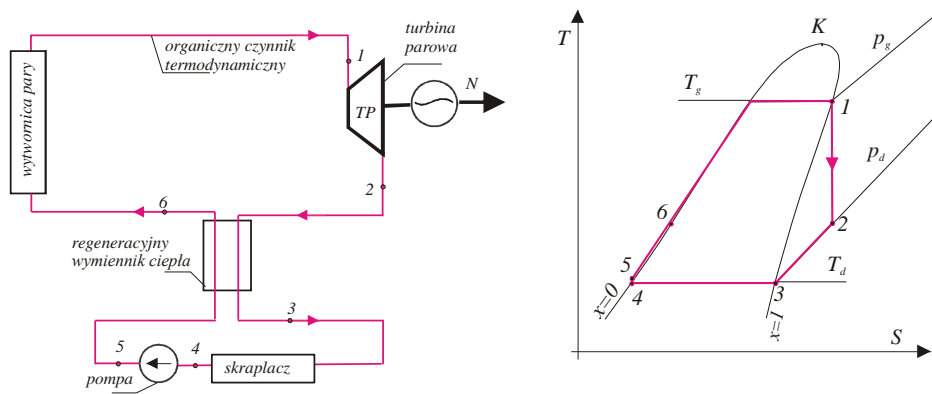
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wielu możliwych rozwiązań wykorzystywania energii odnawialnej i odpadowej jako siły sprawczej dla niskotemperaturowej elektrowni. W pracy poddano również analizie różne warianty współpracy odnawialnych źródeł ciepła z obiegiem ORC.

Organiczny obieg Rankine'a z regeneracją ciepła

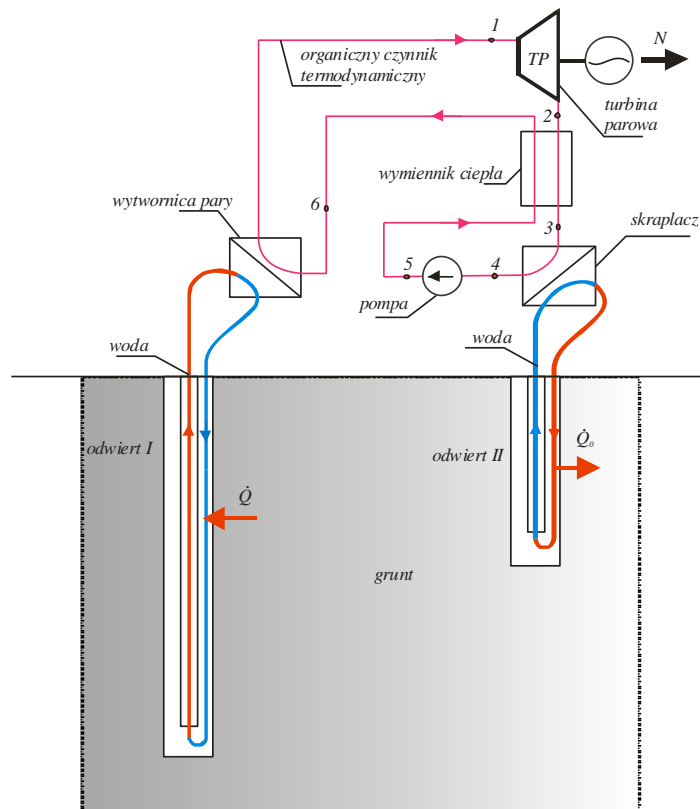
Na rys. 1 przedstawiono schemat i obieg silnika cieplnego z regeneracją ciepła. Obieg termodynamiczny składa się z następujących przemian: 1-2 rozprężanie izentropowe czynnika termodynamicznego w turbinie- wytwarzanie pracy, 2-3 izobaryczne oddawanie ciepła w wymienniku regeneracyjnym, 3-4 izobaryczne i izotermiczne skraplanie par czynnika termodynamicznego, 4-5 izentropowe sprężanie czynnika termodynamicznego w pompie, 5-6 podgrzewanie izobaryczne czynnika termodynamicznego w wymienniku regeneracyjnym, 6-1 izobaryczne wytwarzanie pary.

Analiza efektywności współpracy różnych źródeł ciepła z obiegiem termodynamicznym ORC

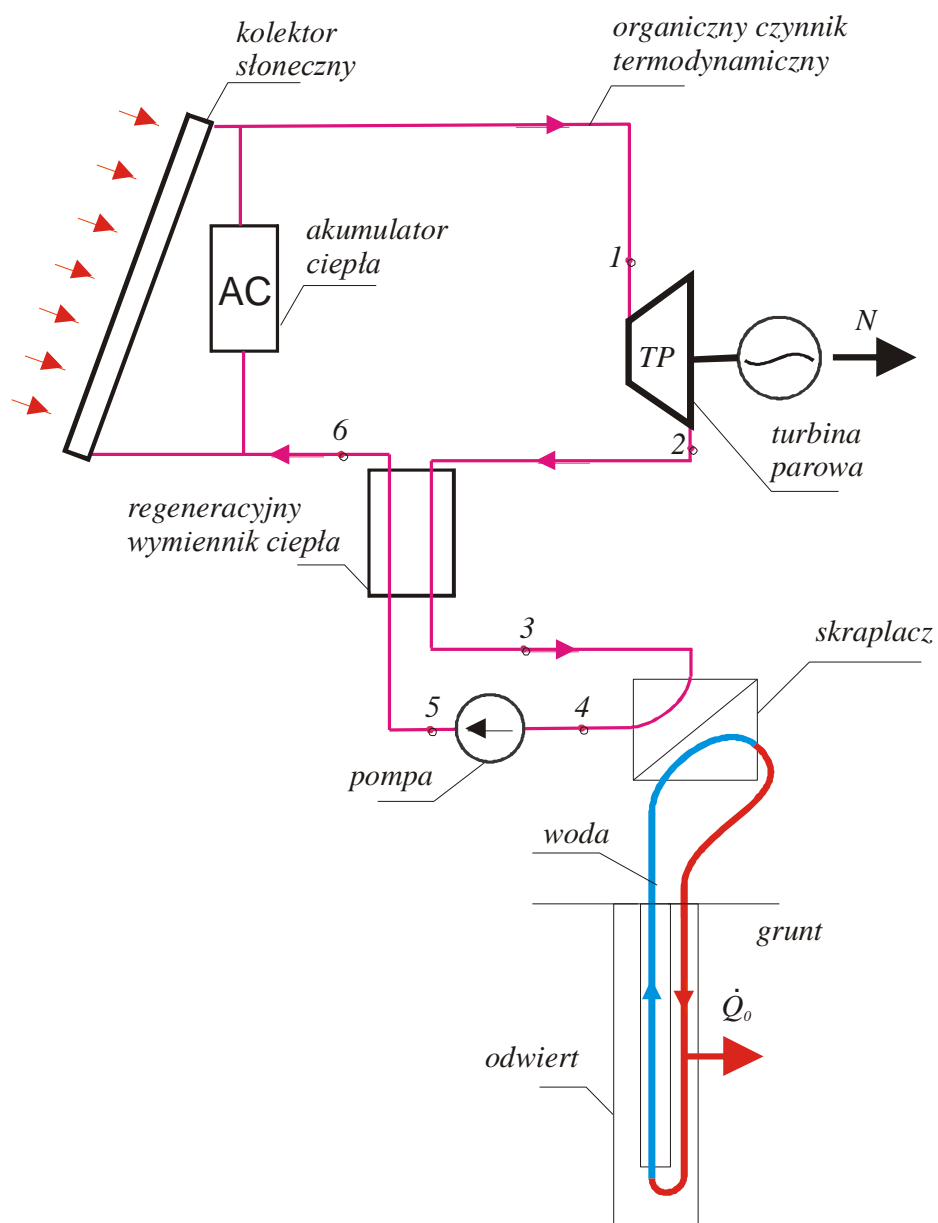
W pracy poddano analizie następujące koncepcje elektrowni niskotemperaturowych o różnych źródłach ciepła: wykorzystanie ciepła geotermalnego (rys. 2), wykorzystanie energii słonecznej (rys. 3 i 4) przy różnych dolnych źródłach ciepła (grunt, woda studzienna) i ciepła odpadowego (rys. 5).



Rys. 1 Schemat i obieg termodynamiczny ORC
 Fig. 1. Diagram and thermodynamic cycle ORC

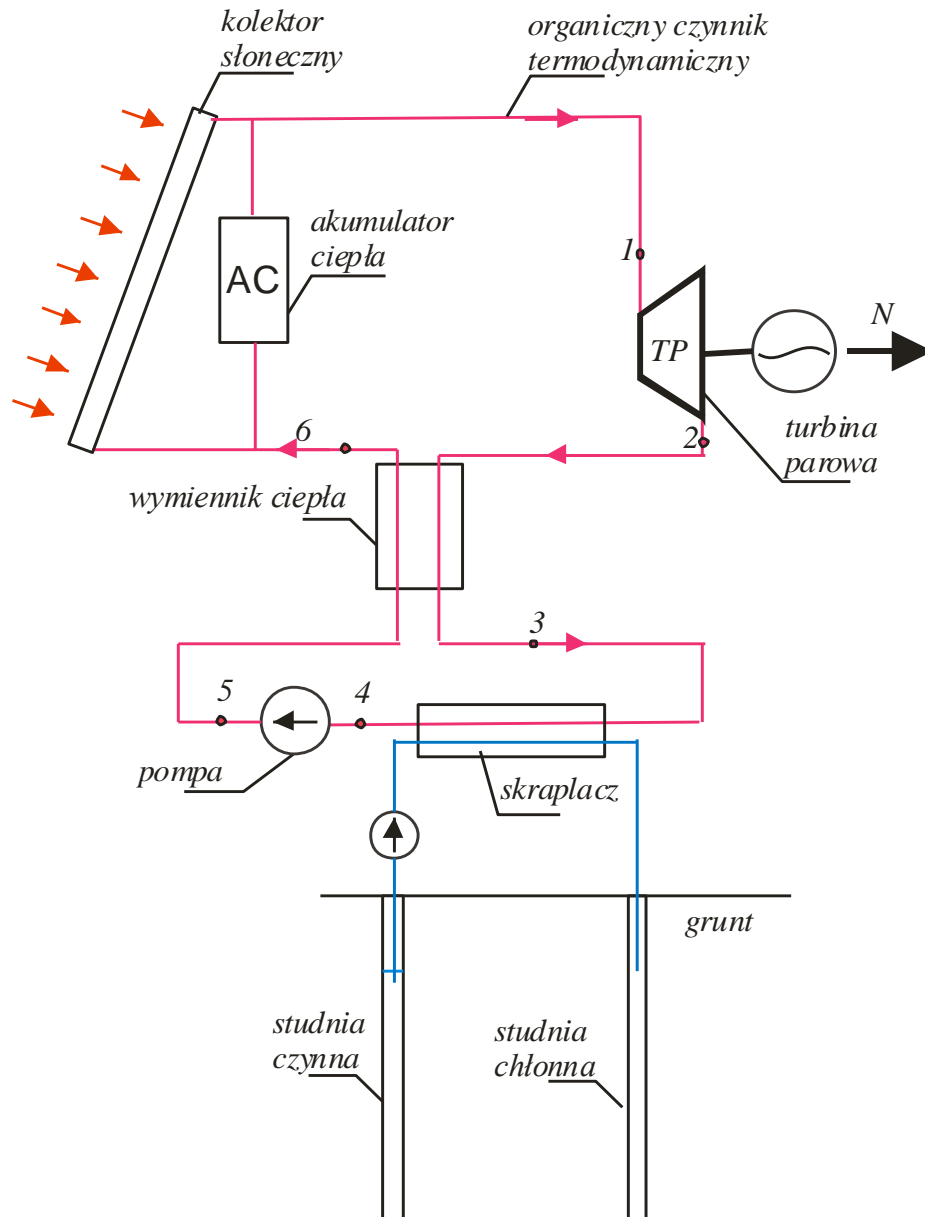


Rys. 2. Schemat elektrowni niskotemperaturowej z wykorzystaniem energii geotermalnej
 Fig. 2. Scheme of low temperature power with using geothermal energy



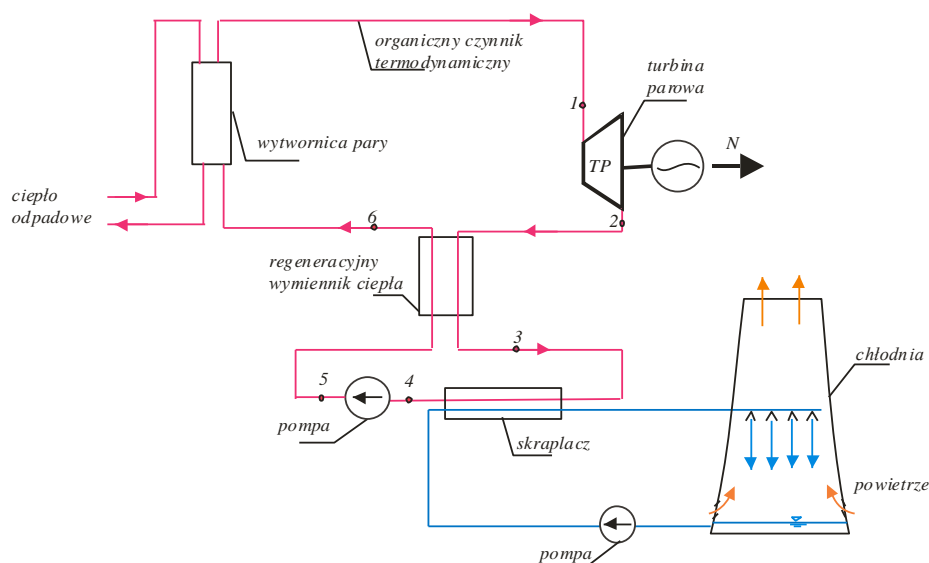
Rys. 3. Schemat elektrowni niskotemperaturowej z wykorzystaniem energii słonecznej i gruntu jako dolnego źródła ciepła

Fig. 3. Scheme of low temperature power with using solar energy and ground as lower heat source



Rys. 4. Schemat elektrowni niskotemperaturowej z wykorzystaniem energii słonecznej i wody studziennej jako dolnego źródła ciepła

Fig. 4. Scheme of lower temperature with using solar energy and water as lower heat source



Rys. 5. Schemat elektrowni niskotemperaturowej z wykorzystaniem ciepła odpadowego i otoczenia jako dolnego źródła ciepła

Fig. 5. Scheme of lower temperature with using waste heat and surroundings as lower heat source

Efektywności pracy poszczególnych koncepcji współpracy obiegu ORC i źródła ciepła z wykorzystaniem regeneratora ciepła przedstawiono w tab. 1 i 2. Zastosowanie regeneracji ciepła, jak powszechnie wiadomo, wpływa na zwiększenie sprawności obiegu. We wszystkich analizowanych przypadkach użyto termodynamiczne organiczne czynniki niskowrzące: oktafluorocyklobutan RC318 i trichlorofluorometan R113.

Tab. 1. Zestawienie sprawności dla czynnika RC318

Tab. 1. Summary of efficiency for RC318

RC318 oktafluorocyklobutan		SKRAPLACZ	
		do gruntu- $T_d=15^{\circ}\text{C}$	do otoczenia- $T_d=25^{\circ}\text{C}$
		□ - sprawność	
WYTWORNICY PARY	z odwiertu- $T_g=70^{\circ}\text{C}$	14,88%	12,37%
	z gruntu ($t_d=10^{\circ}\text{C}$) poprzez pompę ciepła- $T_g=70^{\circ}\text{C}$	-6,69%	-9,17%
	z odwiertu ($t_d=70^{\circ}\text{C}$) poprzez pompę ciepła- $T_g=100^{\circ}\text{C}$	9,19%	7,10%
	z ciepła odpadowego lub kolektora słonecznego płaskiego- $T_g=80^{\circ}\text{C}$	16,86%	14,47%

Tab. 2. Zestawienie sprawności dla czynnika R113

Tab. 2. Summary of efficiency for R113

R113 trichlorofluorometan		SKRAPLACZ	
		do gruntu- $T_d=15^\circ\text{C}$	do otoczenia- $T_d=25^\circ\text{C}$
		□ - sprawność	
WYTWORNICY PARY	z odwiertu- $T_g=70^\circ\text{C}$	14,55%	12,09%
	z gruntu ($t_d=10^\circ\text{C}$) poprzez pompę ciepła- $T_g=70^\circ\text{C}$	-6,99%	-9,46%
	z odwiertu ($t_d=70^\circ\text{C}$) poprzez pompę ciepła- $T_g=100^\circ\text{C}$	8,72%	7,55%
	z ciepła odpadowego lub kolektora słonecznego płaskiego- $T_g=80^\circ\text{C}$	16,50%	14,17%
	z ciepła odpadowego lub kolektora słonecznego z absorberem selektywnym- $T_g=160^\circ\text{C}$	27,53%	25,79%

Z przedstawionej analizy wynika jasno, że ze wzrostem temperatury górnego źródła ciepła T_g (temperatura w wytwornicy pary) i obniżeniem temperatury dolnego źródła ciepła T_d (temperatura w skraplaczu) wzrasta sprawność układu termodynamicznego. Jeżeli częścią układu termodynamicznego oprócz silnika cieplnego jest pompa ciepła to sprawność układu wyraźnie się zmniejsza, a nawet może być ujemna. Oznacza to, że układ termodynamiczny będzie mógł pracować tylko przy dostarczaniu energii z zewnątrz.

Akumulacja ciepła z wykorzystaniem materiałów PCM

Ciepło pochodzące ze źródeł ciepła o cyklicznej mocy dla zapewnienia ich optymalnej współpracy źródła z obiegiem termodynamicznym ORC powinno być magazynowane w okresach nadwyżki a uwalniane w okresach jego niedoboru. Do tego typu źródeł można zaliczyć ciepło pochodzące z procesów technologicznych, np. z chłodzenia wtryskarek, z powietrza wentylacyjnego wywiewanego z kopalń, ciepło ze stacji sprężonego powietrza, ciepło z chłodni kominowych, ciepło z pieców przemysłowych i tuneli grzewczych, ciepło odpadowe z innych procesów produkcyjnych. Problemem akumulacji ciepła i właściwościami materiałów PCM zajmowali się autorzy w pracach [Lipnicki 2000, Wnuk 2001, Pielichowski 2003, Flejtuch 2005, Gut-Wygonik 2006].

Wykorzystywanie ciepła pochodzącego ze źródeł odnawialnych, przede wszystkim energii słonecznej (patrz rys. 3 i 4), które najczęściej działają w sposób okresowy, przy jednoczesnym zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na energię elektryczną odbiorców, powoduje konieczność magazynowania ciepła w odpowiednich układach, tzw. akumulatorach ciepła. Zadaniem akumulatora

ciepła jest gromadzenie ciepła w okresie występowania nadwyżki a następnie uwalnianie w okresie niedoboru.

Szczególną uwagę zwraca się na możliwość wykorzystania związków chemicznych tzw. materiałów fazowo zmiennych - PCM (phase change materials). Akumulacja ciepła przy zastosowaniu tych materiałów najczęściej wykorzystuje zjawisko przemiany fazy stałej w fazę ciekłą i odwrotnie (topnienie i krzepnięcie). Istnieją również układy wykorzystujące przemianę fazową odparowanie-skraplanie; Jednak, mimo dużych zmian entalpii, okazały się niepraktyczne z powodu dużej zmiany objętości układu podczas przejścia fazowego. Obecnie znanych jest kilkaset materiałów PCM, które umożliwiają akumulację ciepła w różnym zakresie temperatur. Wybrane materiały PCM, które mogą być rozpatrywane jako media robocze niskotemperaturowych systemów energetyki solarnej, podano w tab. 3. W dwóch ostatnich wierszach tabeli podano materiały PCM, które mogą mieć zastosowanie w instalacjach wyposażonych w kolektory z absorberem selektywnym, pracujące w wyższych temperaturach.

Tab. 3. Wybrane materiały PCM [Flejtuch 2005, Gut-Wygonik 2006, Jaworski 2008]

Tab. 3. Selected materials PCM [Flejtuch 2005, Gut-Wygonik 2006, Jaworski 2008]

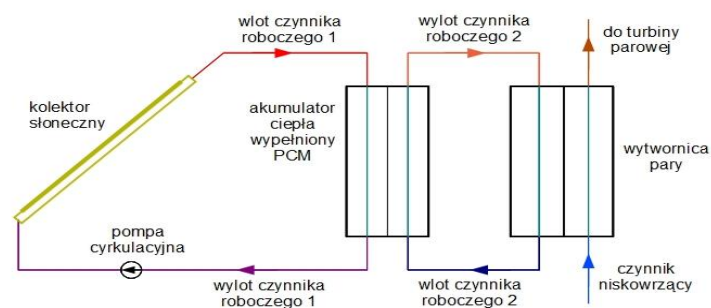
Substancja	Temperatura przemiany fazowej, [°C]	Ciepło przemiany fazowej, [kJ/kg]	Grupa związków
Ba(OH) ₂ · H ₂ O	78	290	nieorganiczne
Na ₂ P ₂ O ₇ · 10H ₂ O	70	184	nieorganiczne
NaOH · 3H ₂ O	64	272	nieorganiczne
Kwas eikozanowy CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH	74	227	organiczne
Kwas oktadekanowy CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	72	203	organiczne
Kwas heksadekanowy CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	65	82	organiczne
Kwas glikolowy HOCH ₂ COOH	63	109	organiczne
Triakontan C ₃₀ H ₆₂	65	252	organiczne
Oktakozan C ₂₈ H ₅₈	62	256	organiczne
Acetamid CH ₃ CO-NH ₂	82	266	organiczne
Thermasorb 175+	79	200	
(CH ₃) ₂ C(CH ₂ OH) ₂	124		organiczne
(HOCH ₂) ₃ CNH ₂	168-172		organiczne

Rozmiary zasobnika są uzależnione od maksymalnej ilości ciepła do zakumulowania oraz rodzaju zastosowanego materiału PCM o określonej temperatu-

rze przemiany fazowej i wartości utajonego ciepła topnienia. Warto przy tym zauważyć, że ciepło przemiany fazowej jest dużo większe niż ciepło właściwe materiałów. Istotnym elementem jest również możliwość magazynowania i uwalniania ciepła o stałej temperaturze w ciągu trwania procesu ładowania i rozładowania akumulatora.

Ważną rolę odgrywa geometria zewnętrzna samych materiałów PCM, która ma wpływ na szybkość procesu pochłaniania i uwalniania ciepła. Stosunek powierzchni zewnętrznej materiału do jego objętości jest niezwykle istotnym parametrem. Duża powierzchnia zewnętrzna powoduje zwiększenie mocy cieplnej na początku procesu.

Przykładowy sposób połączenia akumulatora ciepła, wykorzystującego do akumulacji ciepła materiały fazowo-zmienne, z instalacją solarną przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat słonecznej instalacji z zasobnikiem akumulującym ciepło w materiale PCM

Fig. 6. Scheme of solar installation with heat accumulator PCM

Podsumowanie

Sprawność silników cieplnych, jak wynika z analizy obiegów termodynamicznych, zależy przede wszystkim, od wielkości temperatur źródła górnego i dolnego. Najsprawniejszym obiegiem jest obieg teoretyczny Carnota, który jest odwracalnym obiegiem i z tego powodu przy tych samych temperaturach posiada najwyższą sprawność. Sprawności analizowanych obiegów ORC mogą się tylko zbliżać do obiegu Carnota. Ograniczenie sprawności wynika z wielkości temperatur obu źródeł ciepła. Należy również pamiętać, że temperatura dolnego źródła ciepła jest ograniczona, co do minimalnych wartości, temperaturą otoczenia lub temperaturą gruntu. Sztuczne obniżanie temperatury otoczenia lub gruntu ze względów energetycznych jest nieuzasadnione. Biorąc powyższe

pod uwagę, wykorzystywanie silników cieplnych pracujących według obiegów ORC jest uzasadnione tylko w przypadku dostępu do taniego ciepła dostarczanego z zewnętrznego górnego źródła ciepła. Należy też zwrócić uwagę, że obliczone i przedstawione w tabelach sprawności są sprawnościami skumulowanymi. W przypadku zastosowania pomp ciepła, sprawność te uwzględniają zasilenie pompy ciepła silnikiem cieplnym. Jak widać w tabeli, zastosowanie pompy ciepła przy temperaturze źródła dolnego mniejszej niż ok. 25°C, potrzebna energia zasilająca pompę ciepła nie jest pokrywana energią otrzymywaną z silnika cieplnego (sprawność ujemna). Natomiast zastosowanie pompy ciepła zasilanej ciepłem z odwiertu o temperaturze źródła 70°C sprawności są już dodatnie, od 7,1% do 9,2%. Należy jednak zauważyć, że wykorzystanie samego odwiertu daje sprawność ok. 15% , świadczy to o tym, że zastosowanie pompy ciepła jest niekorzystne od strony energetycznej. Interesującym wydaje się zastosowanie ciepła odpadowego, a także ciepła z kolektorów słonecznych do napędu silnika cieplnego dzięki dość wysokim temperaturom górnych źródeł ciepła. W przypadku korzystania z kolektorów instalacji słonecznych, dla zapewnienia stabilnej pracy układu, potrzebne jest akumulowanie energii w okresie jej nadmiaru a uwalnianie w okresie niedoboru. W tym celu stosowane mogą być akumulatory ciepła zbudowane z materiałów PCM, dzięki czemu temperatura górnego źródła (wytwornicy pary) dla turbiny jest stała a praca układu stabilna.

Literatura

1. BRONICKI L.Y.: *Ormat Rankine cycle configurations for utilization of low temperature heat sources*. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA08, 1-9, Haifa, July 7-9, 2008
2. MIKIELEWICZ D., MIKIELEWICZ J.: *Mikrosiłownie – nowe zastosowania czynników chłodniczych*. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Nr 3, 98-105, 2008
3. WAJS J., MIKIELEWICZ D., MIKIELEWICZ J.: *Sprężarka chłodnicza jako maszyna ekspansyjna w obiegu ORC Mikrosiłowni*. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Nr 3, 101-106, 2009
4. LIPNICKI Z.: *Niskotemperaturowa elektrownia geotermalna*. Czysta Energia, Nr 10, 34-35, 2008
5. LIPNICKI Z., PAŹIK R.: *Heat transfer and temperature distribution outside the borehole*. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA08, 1-7, Haifa, July 7-9, 2008

6. PAJĄK L., BUJAKOWSKI W.: *Efektywność wykorzystania głębokich otworów jako wymienników ciepła wykorzystujących energię geotermalną*, Studia, Rozprawy, Monografie nr 76, IGSM i E PAN, Kraków, 2000
7. LIPNICKI Z., RUBASZEWSKI A.: *Współpraca akumulatora ciepła z układem chłodzenia silnika spalinowego*. Archiwum Motoryzacji, Nr 3, pp. 177-186, 2000
8. WNUK R.: *Akumulacja ciepła z przemianą fazową złoża w słonecznych systemach grzewczych*. Materiały Konferencji „Techniczne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty energetyki odnawialnej”, wyd. IMBEiR, 2001
9. PIELICHOWSKI K., FLEJTUCH K.: *Zastosowanie materiałów fazowo zmiennych do akumulacji ciepła*. Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 1/2003, 7-12, 2003
10. FLEJTUCH K., PIELICHOWSKI K., PIELICHOWSKI J.: *Nisko- i wysokotemperaturowe materiały fazowo-zmienne do akumulacji energii cieplnej*. Materiały Ceramiczne, Nr 1/2005, 13-24, 2005
11. GUT-WYGONIK I.: *Magazynowanie ciepła*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Nr 1/2006, 18-19, 22-25, 2006
12. JAWORSKI M.: *Zastosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w układach chłodzenia elektroniki*. Chłodziwo, tom XLIII 2008r., Nr 3, 42-46, 2008
13. WIŚNIEWSKI G., GOŁĘBIOWSKI S., GRYCIUK M., KUROWSKI K.: *Kolektory słoneczne- Poradnik wykorzystania energii słonecznej*; Centralny ośrodek informacji budownictwa Warszawa 2006.
14. PLUTA Z.: *Słoneczne instalacje energetyczne*.
15. RUBIK M.: *Pompy ciepła - Poradnik*. Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2006.

ANALYSIS OF COOPERATION THE RENEWABLE SOURCES OF HEAT WITH CYCLES OF THE HEAT CYCLES OF THE HEAT EHGINES USING THE LOW BOILING ORGANIC LIQUID

S u m m a r y

The study analyzed the heat engines working as the cycles thermodynamic ORC, using the low boiling organic liquid. The analysis shows that in practice the use of such engines is the effective for the low-cost or the free heat from the upper source.

Key words: organic Rankine cycle, organic fluids