

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Zastosowanie organicznego obiegu Rankine'a (ORC) zasilanego niskotemperaturowymi źródłami ciepła do produkcji energii elektrycznej

JAKUB KAJUREK, ARTUR RUSOWICZ

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA

Słowa kluczowe: organiczny obieg Rankine'a, ORC, ciepło niskotemperaturowe, ciepło odpadowe, źródła ciepła, czynniki robocze, czynniki organiczne

STRESZCZENIE:

Organiczny obieg Rankine'a to obiecująca technologia pozwalająca na wykorzystanie ciepła niski i średniotemperaturowego, którego źródłem mogą być procesy przemysłowe i odnawialne źródła energii, do produkcji energii elektrycznej. Istota jego pracy sprowadza się do pracy parowego obiegu Rankine'a z tą różnicą, że czynnikiem roboczym nie jest woda, a związek organiczny lub nieorganiczny, charakteryzujący się niską temperaturą przemiany fazowej. Artykuł przybliży podstawowe zagadnienia związane z instalacjami ORC: prezentuje ich zasadę działania, wskazuje różnice w stosunku do układów parowych, przybliży podstawowe właściwości czynników roboczych, charakteryzuje źródła ciepła i opisuje możliwości ich wykorzystania oraz analizuje rynek instalacji ORC.

Use of Rankine Organic Cycle (ORC) powered by low temperature heat sources for electricity production

Keywords: Organic Rankine Cycle, ORC, low-temperature heat, waste heat, heat sources, working fluids, organic fluids

ABSTRACT:

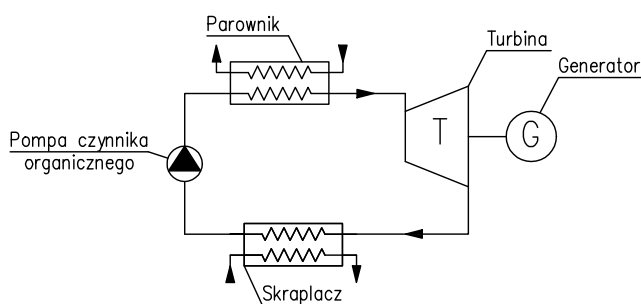
Organic Rankine Cycle (ORC) is a promising technology which allows utilizing low and middle temperature heat from industrial processes or renewable energy sources, to production electrical energy. The organic Rankine cycle works like a Clausius–Rankine cycle but uses organic working fluid with low boiling point instead of water. The article presents basics issues concerning ORC installations. It describes the principle of operation, presents the comparison with steam cycle, discusses the properties of working fluids, characterizes the heat sources giving examples of their usage, and analyzes current market of ORC installations.

1. WPROWADZENIE

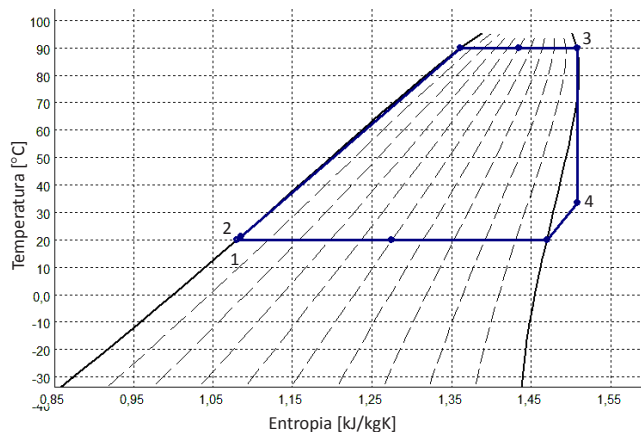
Energia elektryczna jest podstawą działalności gospodarczej człowieka. Ciągły wzrost jej zapotrzebowania w połączeniu z wyczerpywaniem się zasobów naturalnych stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa energetycznego. Konieczne staje się zatem rozwijanie innowacyjnych metod produkcji energii elektrycznej, wykorzystujących zwłaszcza odnawialne źródła energii i ciepło odpadowe powstałe w procesach przemysłowych. Częstym przymiotem łączącym wspomniane źródła jest ich niska temperatura, która eliminuje konwencjonalne metody produkcji energii w oparciu o parowe obiegi Rankine'a. Alternatywą stają się jednak organiczne obiegi Rankine'a (ORC, z ang. Organic Rankine Cycle), które mogą być zasilane ciepłem nisko- i średniotemperaturowym.

Organiczny obieg Rankine'a swą nazwę zawdzięcza czynnikom roboczym, którymi są związki organiczne lub nieorganiczne, charakteryzujące się niską temperaturą przemiany fazowej. Prosty schemat obiegu ORC przedstawia Rysunek 1. Jego początkowym punktem pracy jest stan cieczy nasyconej o ciśnieniu skraplania (oznaczony na Rysunku 2 numerem 1). W pierwszej przemianie czynnik roboczy transportowany jest za pomocą pompy do parownika (nr 2 na Rysunku 2), w którym kolejno ulega podgrzaniu i odparowaniu. Pary czynnika trafiają następnie do turbiny (nr 3 na Rysunku 2), gdzie rozprężając się, wykonują pracę mechaniczną zamienianą w generatorze na energię elektryczną, po czym przepływają do skraplacza, gdzie oddają ciepło do dolnego źródła ciepła. Teoretyczny obieg ORC składa się więc z takich samych przemian jak parowy obieg Rankine'a:

- izochoryczne pompowanie kondensatu: 1-2;
- izobaryczne doprowadzenie ciepła: 2-3;
- izentropowe rozprężanie: 3-4;
- izobaryczne odprowadzenie ciepła: 4-1.



Rysunek 1 Układ ORC



Rysunek 2 Teoretyczny obieg ORC

Zasada działania siłowni parowych i układów ORC jest niemal identyczna, jednakże zastosowanie odmiennych czynników roboczych sprawia, że technologie te różnią się od siebie pod wieloma względami. Woda poza szeregiem swoich zalet, do których zalicza się wysokie ciepło przemiany fazowej, wysokie ciepło właściwe, stabilność chemiczną w szerokim zakresie temperatur, nietoksyczność czy dostępność, ma także wady – wysoką normalną temperaturę wrzenia, która eliminuje jej wykorzystanie w układach niskotemperaturowych, oraz ujemne nachylenie krzywej nasycenia pary na wykresie T-s (temperatura-entropia), przez które para wodna, w celu zabezpieczenia przed jej kondensacją w czasie rozprężania, musi być przegrzewana [23]. Do dodatkowych problemów wynikających z zastosowania wody jako czynnika roboczego należy również zaliczyć ryzyko korozji łopatek, drogie i złożone pod względem konstrukcyjnym turbiny oraz wysokie ciśnienie parowania [25]. Instalacje ORC w porównaniu do układów parowych pracują przy znacznie niższych temperaturach i ciśnieniach, najczęściej nieprzekraczających 30 bar [22]. Proces rozprężania dla wielu czynników kończy się w obszarze pary przegrzanej, dlatego przegrzew par nie jest tu na ogół stosowany. Mała różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem parowania i skraplania powoduje, że w układach tych stosowane są turbiny jednostopniowe [1], zaś duża gęstość płynów roboczych sprawia, że elementy instalacji są małych rozmiarów [23]. Do głównych zalet tej technologii zalicza się: możliwość współpracy z różnymi źródłami ciepła, w tym niskotemperaturowymi, szeroki zakres mocy (od kilkudziesięciu kWe do kilku MWe), kompaktowe rozmiary i modułową budowę jednostek oraz automatyczną pracę i niskie koszty eksploatacji instalacji [26].

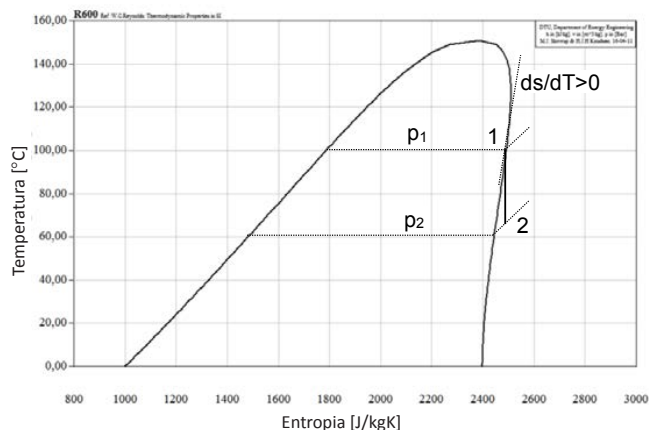
Z kolei do wad organicznego obiegu Rankine'a należy zaliczyć wysoki stosunek mocy pompy do mocy wyjściowej urządzenia rozprężającego, który dla czynników wysokotemperaturowych (np. toluen) wynosi 2-3%, zaś dla niskotemperaturowych (np. 134a) jest równy ok. 10%, oraz niską sprawność, nieprzekraczającą 24% [22].

2. CZYNNIKI ROBOCZE

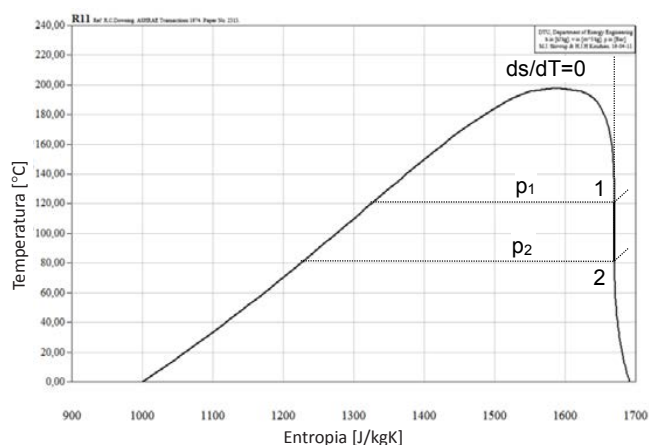
Kluczowym zagadnieniem w przypadku układów ORC jest dobór czynnika roboczego, który poza odpowiednimi właściwościami termofizycznymi powinien spełniać określone kryteria ekonomiczne, bezpieczeństwa i wpływu na środowisko naturalne [15]. Literatura przedmiotu opisuje wiele kwestii, które powinny zostać uwzględnione w czasie wyboru substancji roboczej [11]. Do głównych zalicza się [17]:

2.1 Rodzaj czynnika roboczego

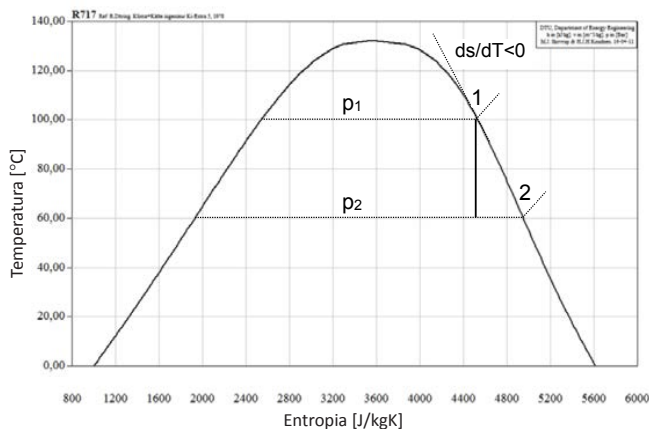
Ze względu na przebieg linii nasycenia pary na wykresie temperatura-entropia (T-s) substancje robocze są klasyfikowane jako płyny suche – z dodatnim nachyleniem krzywej nasycenia pary (Rys. 3), mokre – z ujemnym nachyleniem krzywej nasycenia pary (Rys. 5) i izentropowe (Rys. 4) – z pionowym przebiegiem krzywej nasycenia pary na wykresie T-s. Położenie końcowego punktu rozprężania czynnika roboczego od początku procesu położonego na linii nasycenia pary jest zależne od rodzaju czynnika i dla płynów suchych punkt ten będzie znajdował się w obszarze pary przegrzanej, dla czynników mokrych w obszarze pary mokrej, zaś dla czynników izentropowych będzie położony na linii nasycenia pary. Rodzaj czynnika wpływa na budowę układu ORC, określając między innymi potrzebę przegrzewu pary lub dając możliwość zastosowania regeneracyjnego wymiennika ciepła. Do pracy w organicznym obiegu Rankine'a zalecane są zwłaszcza substancje suche lub izentropowe, dla których proces rozprężania nie przebiega przez obszar dwufazowy [6, 25, 27]. Przegrzew par dla wymienionych czynników nie jest więc potrzebny. Co więcej, wzrost temperatury pary suchej w przypadku związków suchych będzie prowadził do spadku sprawności obiegu, zaś dla substancji izentropowych nie wpłynie istotnie na sprawność obiegu [18]. Jedynie przegrzew par czynników mokrych zwiększa sprawność obiegu ORC, lecz zastosowanie tego zabiegu może z kolei wiązać się z wyższymi kosztami inwestycyjnymi [1].



Rysunek 3 Czynniki suche



Rysunek 4 Czynniki izentropowe



Rysunek 5 Czynniki mokre

2.2 Ciepło przemiany fazowej

Wiele publikacji, m.in.: [21, 25, 27], zaleca stosowanie czynników charakteryzujących się wysokim ciepłem przemiany fazowej, gdyż pochłanianie dużych ilości ciepła wpłynie na zmniejszenie wymaganego przepływu czynnika przez instalację, a to z kolei pozwoli na redukcję jej rozmiarów. Autorzy prac [6, 13] zwracają jednak uwagę na rodzaj źródła ciepła. Instalacje zasilane ze źródeł, których temperatura w czasie dostarczania ciepła

ulega zmianie, powinny współpracować z płynami charakteryzującymi się niskim ciepłem przemiany fazowej, natomiast w przypadku źródeł o stałych parametrach pracy – z substancjami odznaczającymi się wysokim ciepłem przemiany fazowej. Taki dobór czynników w obu przypadkach ma prowadzić do wzrostu mocy układu.

2.3 Temperatura krytyczna

Temperatura krytyczna decyduje o możliwości współpracy czynnika ze źródłem o określonej temperaturze. Nie stanowi jednak granicy jego stosowalności, gdyż czynnik może pracować w układzie nadkrytycznym, pobierając ciepło bez przemiany fazowej. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy [19] sprawność obiegu ORC jest słabą funkcją temperatury krytycznej, natomiast według rezultatów publikacji [12] związki o temperaturze krytycznej wyższej o ok. 30-50 K od temperatury źródła ciepła gwarantują najwyższą moc instalacji.

2.4 Ciśnienia robocze

Ciśnienia robocze to najwyższe i najniższe ciśnienie pracy czynnika wynikające z warunków pracy układu. Limity ograniczające zakres stosowanych ciśnień są zależne w głównej mierze od rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych elementów instalacji. Ciśnienie parowania jest najczęściej wynikiem rachunku ekonomiczno-technicznego, zaś ciśnienie skraplania nie powinno być niższe od ciśnienia atmosferycznego [22].

2.5 Gęstość

Niska gęstość prowadzi do wysokiego przepływu objętościowego, a co za tym idzie zwiększa rozmiary instalacji. Z tego powodu do współpracy z układami ORC zalecane są czynniki o wysokiej gęstości [6].

2.6 Lepkość

Substancje robocze powinny odznaczać się niską lepkością zarówno w fazie ciekłej, jak i gazowej. Zmniejszone zostaną wówczas spadki ciśnienia w przewodach, a zwiększone współczynniki przemieszczania ciepła w wymiennikach ciepła [22].

2.7 Współczynnik przewodzenia ciepła

Współczynnik przewodzenia ciepła wpływa na intensywność wymiany ciepła, a przez to na rozmiar wymienników ciepła, dlatego czynniki robocze powinny odznaczać się odpowiednio dużymi wartościami [25].

2.8 Stabilność chemiczna

Zdolność rozkładu czynnika organicznego jest szczególnie istotna w przypadku jego pracy w organicznych obiegach Rankine'a, w których temperatury pracy znacznie przewyższają te występujące w instalacjach chłodniczych. Maksymalna temperatura pracy instalacji musi być zawsze niższa od temperatury rozkładu związku, ponieważ jakkolwiek dekompozycja substancji roboczej mogłaby prowadzić do powstania gazów nieskraplających lub produktów agresywnych [6].

2.9 Wybuchowość, toksyczność i palność

Oddziaływanie czynnika na zdrowie i bezpieczeństwo użytkownika powinno być jak najmniejsze. Klasyfikacje substancji odnoszące się do ich toksyczności i palności przedstawiają standardy ASHRAE.

2.10 Wpływ na środowisko naturalne

Oddziaływanie czynnik organiczny – środowisko naturalne sprowadza się najczęściej do zjawiska niszczenia warstwy ozonowej określanego przez wskaźnik ODP (z ang. Ozone Depletion Potential) oraz do intensyfikacji efektu cieplarnianego określanej przez wskaźnik GWP (z ang. Global Warming Potential). Dobierana substancja powinna charakteryzować się zerowym wskaźnikiem ODP i małym, racjonalnie uzasadnionym wskaźnikiem GWP.

Do pozostałych właściwości, które powinny zostać uwzględnione w czasie selekcji czynnika roboczego do instalacji ORC, zalicza się oddziaływanie na materiały metaliczne i niemetaliczne, rozpuszczalność w wodzie i olejach, a także dostępność i cenę substancji.

Tabela 1, opracowana na podstawie danych literaturowych, przedstawia dobór czynnika roboczego w zależności od temperatury źródła ciepła. Zawarte są w niej jedynie związki jednoskładnikowe, lecz w instalacjach ORC mogą być również stosowane roztwory, zwłaszcza zeotropowe, które charakteryzują się tzw. poślizgiem temperatury w czasie przemiany fazowej. Zmiana temperatury czynnika roboczego w procesie dostarczania ciepła pozwala na lepsze dopasowanie jego profilu temperatury do profilu temperatury źródła ciepła i przy odpowiednich warunkach pracy instalacji może prowadzić do wzrostu jej sprawności [20]. Przykładowo zastosowanie mieszaniny pentan/heksan przy odpowiednim składzie może prowadzić do wzrostu sprawności

od 6% do 16% w porównaniu do czystego pentanu [8], zaś dla mieszaniny R600a/R601a do 8% wzrostu sprawności w porównaniu do sprawności obiegu z R600a [14]. Mimo że badania dotyczące doboru czynnika roboczego obejmują bardzo szeroką gamę związków, w komercyjnych instalacjach stosowanych jest tylko kilka z nich [6]:

- R134a – energia geotermalna i niskotemperaturowe ciepło odpadowe;
- R245fa – źródła niskotemperaturowe, głównie ciepło odpadowe;
- N-pentan – średnotemperaturowe ciepło odpadowe i średnotemperaturowa energia geotermalna, użyty także w instalacji zasilanej energią promieniowania słonecznego w Nevadzie;
- Solkatherm – ciepło odpadowe;
- OMTS – biomasa;
- Toluen – ciepło odpadowe.

Tabela 1 Przykładowe czynniki robocze układów ORC

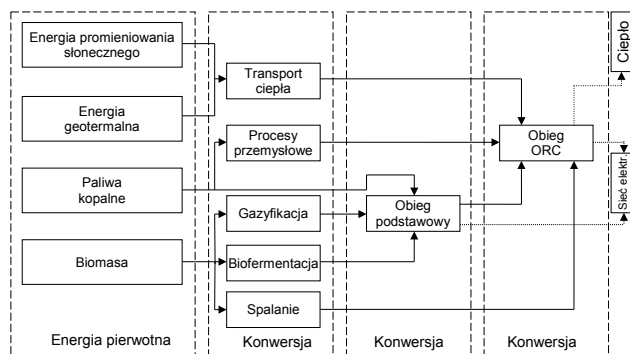
Temperatura źródła [°C]	Czynnik
<100	R32, R134a, R143a
100-120	R134a, R227ea, R290, R1234yf, R1270
120-160	R152a, R245fa, R236fa, R600, R600a, R1243ze
160-200	RC218, R236ea, R245fa, R245ca, R600, R601, R601a
>200	benzen, paraksylen, toluen, heksan

3. ŹRÓDŁA ZASILANIA

Możliwość współpracy z niskotemperaturowymi źródłami ciepła jest kluczową cechą układów ORC. Do głównych źródeł ciepła zasilających takie instalacje zalicza się ciepło odpadowe oraz odnawialne źródła energii: biomasę, energię geotermalną i energię promieniowania słonecznego (Rys. 6). Technologia umożliwia także skojarzoną produkcję energii elektrycznej i ciepła oraz pozwala na budowę układów hierarchicznych z turbinami gazowymi lub silnikami tłokowymi, w obu przypadkach zwiększając całkowitą sprawność instalacji.

3.1 Biomasa i biogaz

Zgodnie z definicją zaproponowaną przez Parlament Europejski biomasa to ulegająca biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie



Rysunek 6 Źródła ciepła układów ORC

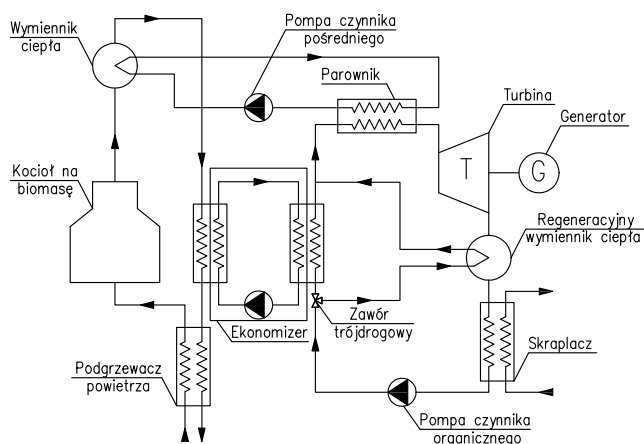
z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybactwa i akwakultury, a także ulegająca biodegradacji część odpadów przemysłowych i miejskich [9]. To źródło szeroko dostępne, dostarczające ok. 10% światowej energii pierwotnej [16], wykorzystywane do bezpośrednich celów energetycznych czy np. do produkcji paliw motorowych. Biomasa może stanowić źródło zasilania zarówno instalacji o spalaniu zewnętrznym (siłownie parowe, instalacje ORC, silniki Stirlinga), jak i układów o spalaniu wewnętrznym (silniki tłokowe i turbiny gazowe) po uprzedniej przeróbce [4].

3.1.1 Spalanie biomasy

Instalacje ciepła użytecznego małej mocy zasilane lokalnymi zasobami słomy lub drewna to najprostszy przykład wykorzystania biomasy. Jest to źródło, które zastępuje paliwa kopalne w siłowniach parowych. Współspalanie biomasy z węglem w kotłach pyłowych lub fluidalnych jest już powszechnie stosowanym rozwiązaniem. W przypadku instalacji ORC spalana biomasa jest jednym z głównych źródeł zasilania. Około 50% inwestycji opartych jest na tej technologii [30]. Układy takie przeznaczone są najczęściej do produkcji energii elektrycznej i ciepła w kogeneracji na małą skalę. W porównaniu do obiegu parowego obiegi z czynnikiem organicznym zapewniają automatyczną pracę i gwarantują odpowiednią sprawność już przy niskich parametrach zasilania. Z tego powodu rozwiązania takie zasilają często miejskie systemy ciepłownicze oraz są wykorzystywane do przygotowania ciepła technologicznego w zakładach przemysłowych [25].

Rysunek 7 przedstawia uproszczony schemat instalacji ORC zasilanej spalaną biomasą. W systemach takich ciepło spalania biomasy jest transportowane do parownika za pomocą substancji pośredniczącej (olej termiczny), krążącej w obie-

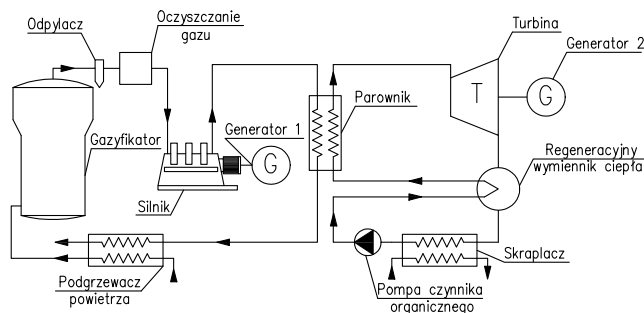
gu zamkniętym. Temperatura odparowania czynnika dla układów pracujących w kogeneracji jest równa ok. 300°C, zaś temperatura skraplania, w zależności od przeznaczenia ciepła technologicznego, może mieścić się w zakresie od 60°C do 120°C [27]. W celu redukcji strat ciepła spaliny wylotowe mogą być dochładzane przez czynnik roboczy wpływający do parownika. Sprawność instalacji ORC pracujących w kogeneracji dochodzi do 88%, zaś wytwarzających jedynie energię elektryczną i oddających ciepło skraplania czynnika do otoczenia wynosi maksymalnie 18% [22].



Rysunek 7 Instalacja ORC zasilana biomasą

3.1.2 Gazyfikacja biomasy

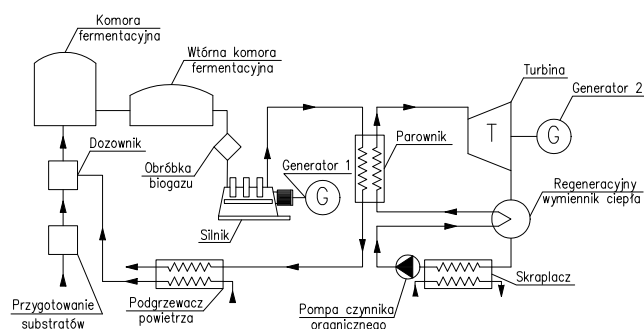
Gazyfikacja to proces, w czasie którego w wysokiej temperaturze i przy ograniczonym dostępie tlenu dochodzi do zamiany biomasy w mieszaninę gazów (H_2 , CO , CO_2 i CH_4), zwaną gazem syntezowanym, oraz pozostałość mineralną w postaci popiołu. Gazogeneratory wykorzystywane są w przypadku biomasy, która ze względu na swą budowę bądź specyficzne właściwości dostarcza problemów w czasie spalania. Zagazowywanym paliwem może być więc torf, drewno, odpady przemysłowe i komunalne. Powstały palny gaz wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej przy użyciu turbin gazowych lub silników tłokowych. Ciepło odpadowe procesu może zaś stanowić górne źródło ciepła instalacji ORC (Rys. 8). Ze względu na wysokie temperatury spalania nie jest zalecane bezpośrednie wykorzystywanie gazu do zasilania układów ORC [22]. W porównaniu do systemów wykorzystujących technologię ORC zasilaną spalaną biomasą, systemy z gazyfikacją charakteryzują się wyższą całkowitą sprawnością, ale również wyższymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi [27].



Rysunek 8 Instalacja ORC z gazyfikacją biomasy

3.1.3 Biofermentacja

Reaktory fermentacyjne to rozwiązania stosowane w przypadku biomasy charakteryzującej się bardzo dużą zawartością wilgoci uniemożliwiającej bezpośrednie spalanie. Do głównych materiałów wsadowych zalicza się tu organiczne odpady rolnicze i osady ściekowe. Fermentacja beztlenowa to proces biochemiczny, w czasie którego bakterie anaerobowe rozkładają substancje organiczne do związków prostych. Około 60% organicznej substancji wsadowej zamienianych jest w biogaz, składający się w zależności od zastosowanych substratów i parametrów reakcji z 50-75% metanu, 25-45% dwutlenku węgla i śladowych ilości siarkowodoru, azotu, tlenu i wodoru [7]. Powstałe paliwo o wartości opałowej w granicach 20-26 MJ/m³ wykorzystywane jest do produkcji energii elektrycznej z zastosowaniem silników tłokowych lub turbin gazowych. Ciepło odpadowe procesu może zaś zasilać instalację ORC (Rys. 9).



Rysunek 9 Instalacja ORC z biofermentacją biomasy

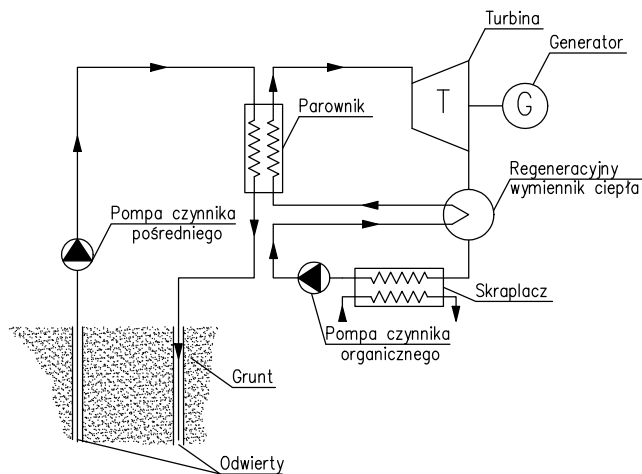
3.2 Energia geotermalna

Energia geotermalna to: energia wyzwolana w procesach naturalnego rozpadu izotopów promieniotwórczych (U^{238} , U^{235} , K^{40} , Th^{232} i inne), ciepło krystalizacji substancji zewnętrznego ciekłego jądra Ziemi, energia rezydualna (pochodząca z okresu tworzenia Ziemi) i dyssypowana w ciepło energia pływów w płynnym wnętrzu Ziemi [7].

Jej ilość zgromadzona we wnętrzu Ziemi jest ogromna. Szacuje się, że w wyniku przepływu ciepła do powierzchni Ziemi dopływa ok. 4×10^{23} W [2]. Średni gradient temperatury wnętrza Ziemi jest równy ok. 30 K/km. Jest to jednak wartość zależna od położenia, dla niektórych obszarów np. aktywnych wulkanicznie może wynieść ok. 100 K/km. Zasoby o największym potencjale energetycznym położone są głównie w regionach związanych z aktywnością wulkaniczną i sejsmiczną. Źródła geotermalne mogą występować w postaci wód o temperaturze od 20°C do 150°C, par w zakresie temperatur od 100° do 300°C lub nagranych skał [2].

Wykorzystanie energii geotermalnej zależy głównie od temperatury źródła, a w przypadku gorących wód i par również od ilości rozpuszczonych gazów i soli. Zasoby niskotemperaturowe przy zastosowaniu kolektorów ziemnych mogą służyć jako dolne źródło pomp ciepła wykorzystywanych do ogrzewania pomieszczeń czy przygotowania ciepłej wody użytkowej. Źródła geotermalne o temperaturze powyżej 80°C mogą być już stosowane do produkcji energii elektrycznej [22]. Wybór technologii produkcji nadal jest jednak zależny od temperatury i parametrów wody zasilającej, przy czym wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje elektrowni geotermalnych:

- Z temperaturą źródła wyższą od 180°C – systemy z odparowaniem wody w rozprężaczu (flash tank) lub kierowaniem pary bezpośrednio do turbiny, skąd po rozprężaniu i skraplaniu jest ona ponownie wtłaczana do złoża. Sprawność elektrowni z parą bezpośrednio kierowaną do turbiny ze względu na niską temperaturę pary jest mniejsza od konwencjonalnych siłowni parowych i dochodzi do 18% [2].
- Z temperaturą źródła niższą niż 180°C; w takich elektrowniach stosuje się instalacje binarne – dwuczynnikowe, w których gorąca woda lub inny czynnik transportujący ciepło ze źródła geotermalnego zasila parownik, po czym trafia ponownie do złoża (Rys. 10). Całkowita sprawność takich instalacji wykorzystujących technologię ORC wynosi od 5% do maksymalnie 15% [25]. Niska sprawność takich systemów wynika z dużego zużycia energii przez pompy tłoczne – od 30% do nawet 50% energii elektrycznej produkowanej przez układ ORC [22].



Rysunek 10 Instalacja ORC zasilana energią geotermalną

3.3 Energia promieniowania słonecznego

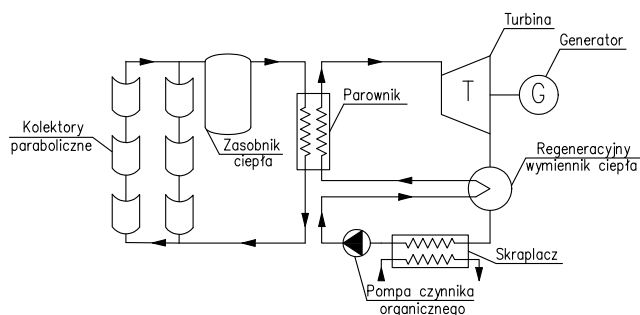
Źródłem energii promieniowania słonecznego są reakcje termojądrowe występujące na Słońcu. Promieniowanie to w ilości równej $3,845 \times 10^{26}$ W jest wysyłane w przestrzeń kosmiczną z natężeniem 63,11 MW/m². Gęstość promieniowania słonecznego docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery wynosi zaś 1367 W/m² [7]. Obecnie energia promieniowania słonecznego jest powszechnie wykorzystywana do produkcji ciepła użytkowego za pośrednictwem kolektorów słonecznych i produkcji energii elektrycznej przy zastosowaniu ogniw fotowoltaicznych. Są to najczęściej instalacje autonomiczne małej mocy służące zaspokojeniu potrzeb energetycznych pojedynczych budynków. Oprócz wymienionych metod energia promieniowania słonecznego zasila elektrownie słoneczne z kolektorami skupiającymi, gdzie jej konwersja do energii elektrycznej może odbywać się przy udziale organicznego obiegu Rankine’a.

Współcześnie wśród elektrowni słonecznych z kolektorami skupiającymi wyróżnia się technologię z wieżami słonecznymi, kolektorami parabolicznymi (Solar Dish), kolektorami Fresnela i kolektorami parabolicznymi (Tab. 2). W przypadku dwóch pierwszych sposobów ze względu na wysokie temperatury stosowane są jedynie siłownie parowe lub silniki Stirlinga [30]. Układy ORC zasilane są ze źródeł o temperaturze niższej od 400°C, dlatego współpracują jedynie z kolektorami parabolicznymi lub kolektorami Fresnela. Są to najczęściej instalacje o mocy do kilku MW z obiegiem pośrednim i zasobnikiem ciepła, który stanowi zabezpieczenie przed chwilowym wpływem warunków atmosferycznych na pracę układu

(Rys. 11). Jedną z pierwszych instalacji tego typu z kolektorami parabolicznymi i n-pentanem jako czynnikiem roboczym o mocy elektrycznej 1 MW powstała w 2006 roku w Arizonie i charakteryzuje się średnią sprawnością na poziomie 12%, ze sprawnością modułu ORC równą 20% [22]. W zależności od czynnika roboczego i zastosowanego kolektora sprawność podobnych systemów może wahać się w zakresie od 5% do 20% [27].

Tabela 2 Sposoby wykorzystania energii promieniowania słonecznego (na podstawie [3])

Rodzaj kolektora	Temperatura [°C]	Wykorzystanie
Stawy słoneczne	80-90	Ciepło użyteczne, ORC
Kolektory płaskie	<150	Ciepło użyteczne, ORC
Kolektory próżniowe	90-200	Ciepło użyteczne, ORC
Kolektory paraboliczne	200-400	ORC, obiegi parowe
Kolektory Fresnela	100-400	ORC, obiegi parowe
Kolektory paraboloidalne (Solar Dish)	750	Obiegi parowe
Wieże słoneczne	1000	Obiegi parowe



Rysunek 11 Instalacja ORC zasilana energią promieniowania słonecznego

Znacznie rzadziej spotykaną technologią, wykorzystującą energię promieniowania słonecznego do zasilania układów ORC, są tzw. stawy słoneczne (SPPP – solar pond power plant). Staw słoneczny jest zbiornikiem wodnym o odpowiednim zasoleniu, minimalnym na powierzchni zbiornika i maksymalnym w jego najniższym punkcie. Warstwa dolna ze względu na swój ciemny kolor odpowiada za absorpcję promieniowania słonecznego. Jej duża gęstość spowodowana wysokim zasoleniem sprawia, że pochłonięta energia jest akumulowana. Średnie wartości temperatur sięgają tam

do 90°C-100°C, stanowiąc w ten sposób źródło ciepła dla układu ORC. Sprawność takiego systemu przeznaczonego do produkcji energii elektrycznej waha się od 0,8% do 2,0% [25].

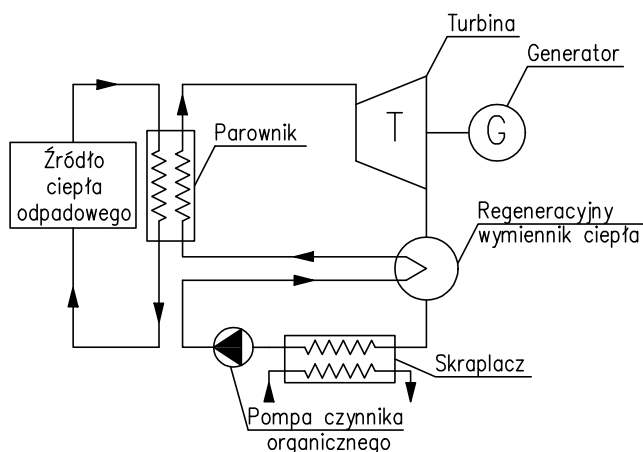
3.4 Ciepło odpadowe

Ciepło odpadowe odnosi się do ilości energii, która pozostaje niewykorzystana w procesach jej przetwarzania i jest beużytecznie oddawana do otoczenia. Źródłem ciepła odpadowego są m.in. spaliny silników tłokowych czy turbin gazowych, reakcje chemiczne oraz procesy chłodzenia produktów i urządzeń. W zależności od temperatury ciepło odpadowe dzieli się na: wysokotemperaturowe z temperaturą wyższą od 650°C, średniotemperaturowe w zakresie temperatur od 230°C do 650°C i niskotemperaturowe z temperaturą niższą od 230°C. Współcześnie istnieje wiele technologii pozwalających na wykorzystanie ciepła odpadowego (Tab. 3), zwłaszcza na ciepło o innych parametrach. Do tej grupy rozwiązań zalicza się różnego rodzaju wymienniki ciepła, w tym wymienniki regeneracyjne, ekonomizery, podgrzewacze powietrza, rurki ciepła i parowniki, jak również pompy ciepła oraz absorpcyjne i adsorpcyjne urządzenia chłodnicze. Wykorzystanie ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej może odbywać się również w oparciu o kilka sposobów, np. przy wykorzystaniu parowego obiegu Rankine’a, organicznego obiegu Rankine’a czy obiegu Kaliny. Parowe obiegi Rankine’a zasilane spalinami turbin gazowych, tzw. układy gazowo-parowe, znajdują coraz częściej zastosowania w elektrowniach dużej mocy. Dla mocy poniżej 50 MW konkurencyjny staje się jednak organiczny obieg Rankine’a [30]. Nie tylko zmniejsza koszty inwestycyjne, ale także może pracować przy niższych temperaturach zasilania [24]. Sprawność elektryczna turbin dużych mocy współpracujących z instalacjami ORC dochodzi do 60%, zaś mikroturbin o mocach ok. 100 kW_e do 40% [27].

Układy ORC stosowane są również w instalacjach z silnikami tłokowymi, w których około 2/3 energii są odprowadzane w spalinach o temperaturze w zakresie 400°C-900°C. Odzysk ciepła odpadowego w takich systemach prowadzi do 33% wzrostu sprawności w stosunku do sprawności samego silnika tłokowego [23]. Podejmowane są także próby zastosowania tej technologii w samochodach ciężarowych i osobowych, w których energia mechaniczna układu ORC byłaby bezpośrednio wykorzystywana do napędu samochodu

(przy współpracy z silnikiem tłokowym) lub alternatora. Badanie prowadzone przez Hondę na silniku o mocy 19,2 kW pozwoliły na 13% przyrost sprawności [22]. Problemem w tego typu rozwiązaniach staje się lokalizacja wymienników ciepła w pojazdach, a także zmienne parametry źródła ciepła.

W zależności od źródła ciepła odpadowego układu ORC mogą pracować w systemach dwuczynnikowych, z pętlą czynnika pośredniczącego (rysunek 12), lub w instalacjach z bezpośrednim odparowaniem czynnika roboczego w źródle ciepła.



Rysunek 12 Instalacja ORC zasilana ciepłem odpadowym

4. RYNEK INSTALACJI ORC

Analizy rynku instalacji ORC ze względu na moc i źródło zasilania dokonano w oparciu o referencje czołowych przedstawicieli tej technologii, wśród których znalazły się następujące firmy: Adoratec [31], Electratherm [32], Enertime [33], Enogia [34], Exergy [36], General Electric [43], GMK [37], Kaishan [38], Ormat [40], Triogen [44], Turboden [45] i UTC Power [46].

Koncepcje siłowni opartych o pary i organiczny obieg Rankine'a powstawały w tym samym czasie, jednak dopiero w latach 70. dwudziestego wieku ta druga zaczęła zyskiwać coraz większe uznanie, które pozwoliło na budowę pierwszej elektrowni ORC w 1967 roku w Rosji na Kamczatce [25]. Instalacja o mocy 680 kW_e zasilana energią geotermalną w postaci wody o temperaturze 81°C wykorzystywała R12 jako czynnik roboczy [5]. W kolejnych latach liczba instalowanych jednostek była niewielka. Dopiero od roku 2005, gdy zaczęto powstawać coraz więcej układów zasilanych spalaną biomasą, sytuacja uległa znacznej zmianie (Wykres 1). W roku 2012 oddano do użytku ponad 80 instalacji, z czego 46 opartych na biomasie, 25 na ciepłe odpadowym, 10 na energii

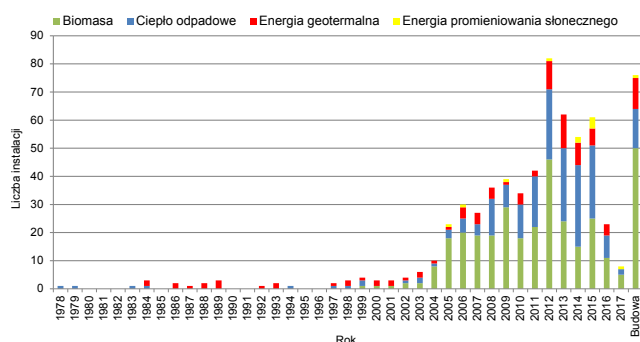
Tabela 3 Sposoby wykorzystania ciepła odpadowego (na podstawie [3])

Kategoria	Źródło ciepła	Zakres temperatur [°C]	Technologia odzysku
Wysokotemperaturowe (>650°C)	Piece do produkcji niklu	1370-1650	Parowe obiegi Rankine'a Generatory pary Podgrzewacze
	Piece do produkcji szkła	1000-1550	
	Piece do produkcji miedzi	900-1100	
	Piece do produkcji aluminium	650-760	
	Piece do produkcji cynku	760-1100	
	Piece do produkcji cementu	620-730	
	Instalacje wodorowe	650-1000	
Średiotemperaturowe (230-650°C)	Spaliny turbin gazowych	350-600	Parowe obiegi Rankine'a Organiczne obiegi Rankine'a Podgrzewacze
	Spaliny silników tłokowych	400-900	
	Piece do suszenia i pieczenia	230-600	
	Systemy chłodzenia pieców	425-650	
Niskotemperaturowe (<230°C)	Skraplanie pary	50-90	Organiczne obiegi Rankine'a Obiegi Kaliny Pompy ciepła Chłodzenie absorpcyjne i adsorpcyjne Podgrzewacze Przygotowanie ciepłej wody użytkowej Ogrzewanie pomieszczeń
	Chłodzenie silników o spalaniu wewnętrznym	60-120	
	Chłodzenie cieczy i produktów stałych	30-230	
	Chłodzenie pieców, piekarników, suszarni	90-230	
	Chłodzenie sprężarek, łożysk i innych elementów	30-80	

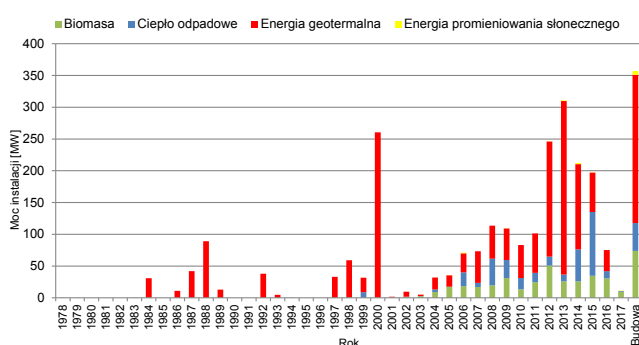
geotermalnej i jedną zasilaną energią promieniowania słonecznego. 2016 rok to ponowny spadek zainteresowania technologią ORC – oddana liczba nowych jednostek była mniejsza niż w roku 2005. Aktualnie w budowie nadal pozostaje ok. 80 układów, z których ponad 60% będzie zasilanych biomasą.

Mimo że w latach 80. i 90. powstawało niewiele nowych instalacji, głównie zasilanych energią geotermalną, to charakteryzowały się one dość dużymi mocami, np. elektrownie powstałe w roku 1988 w USA i 1998 na Filipinach o mocach odpowiednio równych 73 MW_e i 50 MW_e [40]. Szczególnie wyróżniającym się rokiem pod względem mocy zainstalowanej w układach ORC był rok 2000, w którym powstały dwie instalacje ORC zasilane energią geotermalną o mocach równych 130 MW_e. Sumaryczna moc jednostek zainstalowanych w tym roku znacznie przekraczała wartości w kolejnych latach, pomimo tego, że oddawano do użytku znacznie więcej nowych instalacji, również zasilanych energią geotermalną (Wykres 2).

Wykres 1 Liczba instalacji ORC w kolejnych latach



Wykres 2 Sumaryczna moc instalacji w kolejnych latach

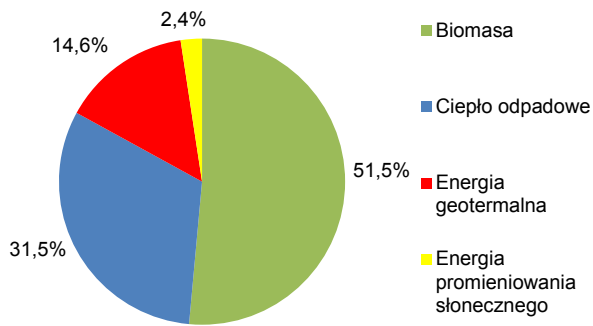


Instalacje ORC zasilane spalaną biomasą stanowią ponad 51% wszystkich zainstalowanych jednostek (Wykres 3) z około 15% udziałem mocy w tej technologii (Wykres 4). Średnia moc elektryczna analizowanych instalacji wynosi 1,2 MW_e, z czego

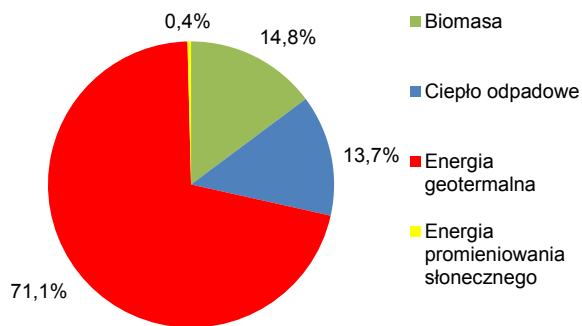
największe, zlokalizowane w Kanadzie, odznaczają się mocą na poziomie 13 MW_e [45]. Układy te, zbudowane z dwóch jednostek ORC o mocy 6,5 MW_e, służą jedynie produkcji energii elektrycznej i zasilane są odpadami przemysłu drzewnego. Liderami tej technologii są jednak Niemcy, Włochy i Austria. W krajach tych zarówno ilość, jak i moc jednostek zasilanych z tego źródła w stosunku do pozostałych państw jest największa (Wykresy 5 i 6).

Energia geotermalna stanowi źródło ciepła dla ok. 15% (Wykres 3) instalacji ORC, dostarczając ponad 71% mocy (Wykres 4). Średnia moc układów wynosi 20,36 MW_e. Największa elektrownia geotermalna oparta wyłącznie na tej technologii znajduje się w Kenii. Obiekt ten o początkowej mocy 13 MW_e rozbudowywano czterokrotnie: w 2008 roku o 35 MW_e, w 2013 roku o 36 MW_e, w 2014 roku o 26 MW_e i w 2016 roku o 29 MW_e [45]. Łączna moc wszystkich jednostek wynosi więc 139 MW_e. Również powstająca obecnie w Indonezji największa elektrownia geotermalna na świecie o mocy 330 MW_e będzie wyposażona w układy ORC, zasilane parą opuszczającą turbinę parową [29]. Największym producentem energii elektrycznej w oparciu o tę technologię są Stany Zjednoczone, Turcja i Nowa Zelandia (Wykres 6). Układy ORC zasilane ciepłem odpadowym stanowią 31,5% wszystkich instalacji (Wykres 3) i posiadają ponad 13% udział w wytwarzanej mocy. Średnia moc analizowanych instalacji jest równa 1,82 MW_e. Największa – o mocy 51 MW_e, zrealizowana przez firmę General Electric – powstała w 2005 roku w Chinach [43]. Kraj ten obok USA i Kanady jest głównym producentem energii elektrycznej w oparciu o tę technologię (Wykres 6). Niemal tyle samo układów co USA czy Chiny posiadają Niemcy i Włochy (Wykres 5), jednak w tych krajach są to jednostki niewielkich mocy. Energia promieniowania słonecznego jest źródłem ciepła dla najmniejszej ilości instalacji ORC – ok. 2,3% (Wykres 3), posiada także niewielki udział w rynku mocy, ok. 0,3% (Wykres 4). Średnia moc instalacji jest tu równa 580 kW_e. Największy system tego typu o mocy 3,8 MW_e budowany jest przez firmę Turboden w Danii [45]. Będzie on zasilany kolektorami parabolicznymi o łącznej powierzchni ok. 30 tys. m².

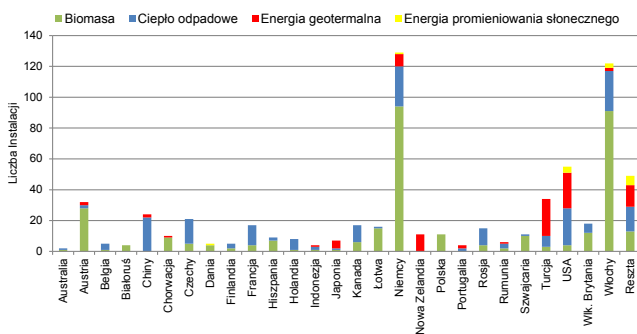
Wykres 3 Udział instalacji ORC zasilanych z danego źródła



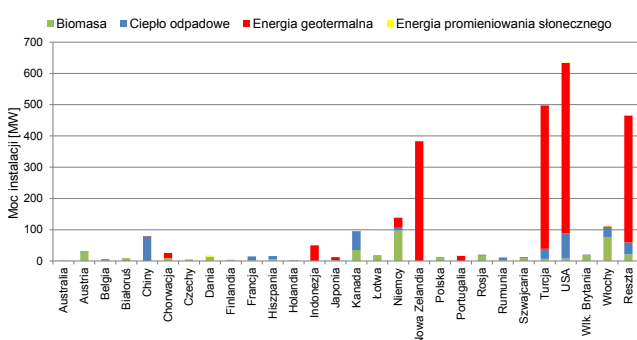
Wykres 4 Udział mocy instalacji ORC w zależności od źródła ciepła



Wykres 5 Liczba instalacji ORC w danym kraju



Wykres 6 Sumaryczna moc instalacji ORC w danym kraju



W Polsce biomasa jest jedynym źródłem zasilającym instalacje ORC (Wykres 5). Łączna moc aktualnie pracujących systemów wynosi 10,17 MW_e, zaś w trakcie realizacji pozostają trzy inwestycje, których moc wyniesie 2873 kW_e. Pierwszy układ

ORC w Polsce powstał w Ostrowskim Zakładzie Ciepłowniczym w roku 2007, gdzie zastąpił jeden spośród pięciu kotłów węglowych eksploatowanych w elektrociepłowni. Instalację ORC zasilają dwa kotły z obiegiem oleju termalnego o mocy cieplnej 9 MW_{th}, opalany odpadami drzewnymi [41]. W Hotelu Arłamów instalacja ORC pracuje w układzie trójgeneracji [42], w którym latem ciepło skraplania czynnika zasila agregaty absorpcyjne produkujące wodę lodową. W pozostałych przypadkach systemy ORC pracują w kogeneracji, produkując ciepło na cele technologiczne lub zasilając miejskie systemy ciepłownicze (Tab. 4). Dostawcy technologii ORC zapewniają rozwiązania w szerokim zakresie temperatur i mocy. Tabela 5 przedstawia ofertę wybranych producentów modułów ORC, którzy na stronach internetowych zamieścili dane swoich urządzeń. W porównaniu do instalacji opartych na parowych obiegach Rankine'a, instalacje oparte na organicznym obiegu Rankine'a składają się z niewielkiej liczby elementów, gdzie do głównych należy zaliczyć pompę zasilającą, parownik, skraplacz, regeneracyjny wymiennik ciepła, urządzenie rozprężające oraz system kontroli. Z tego powodu są to układy sprzedawane najczęściej jako gotowe moduły o mocach od kilku kW do kilku MW. Jednostka o najmniejszej mocy – 10 kW_e – oferowana jest przez firmę Enogia, zaś o największej – ponad 10 MW_e – przez firmę Turboden. Oferta producentów różni się także m.in. temperaturą zasilania (od minimalnej 77°C, przy której mogą pracować jednostki firmy Electrathern), sposobem chłodzenia skraplacza – cieczą lub powietrzem, czynnikiem roboczym, przy czym dla większości urządzeń jest nim R245fa, czy urządzeniem rozprężającym – głównie wybór pomiędzy turbiną a rozprężarką śrubową. Budowa i przeznaczenie mają decydujący wpływ na cenę agregatu. Dla jednostek wysokotemperaturowych z toluenem lub OMTS i turbiną ceny wahają się w zakresie od 1000 do 3000 €/kW, natomiast dla jednostek średnio- i niskotemperaturowych z rozprężarkami śrubowymi lub scroll w zakresie od 1500 do 2500 €/kW [26]. Poza dostawą gotowych jednostek wiele firm oferuje możliwość zaprojektowania instalacji dostosowanej do określonego źródła ciepła i wykonania całego projektu „pod klucz”.

Tabela 4 Instalacje ORC w Polsce

Lokalizacja	Rok uruchomienia	Źródło zasilania	Dostawca technologii	Moc elektryczna [kW _e]	Moc cieplna [MW _{th}]	Uwagi
Ostrów Wielkopolski	2007	Biomasa	Turboden	1500	7,2 (woda 65/85°C)	Ciepło miejskie
Zielona Góra	2009			1500	7,5 (woda 80/95°C)	Produkcja pelletu
Krasocin (Świdno)	2009			1500	7,95 (woda 60/90°C)	Ciepło i energia elektryczna na potrzeby tartaku
Arłamów	2012			1400	5,6 (woda 80/90°C)	Ciepło i energia elektryczna na potrzeby hotelu. Pierwszy w Polsce układ trójgeneracji opalany biomasą. W okresie letnim 1.8 MW ciepła i 2.7 MW chłodu w postaci wody lodowej 8/13°C (2 agregaty absorpcyjne)
Orzeszkowo	2013			1800	9,79 (woda 60/90°C)	Produkcja pelletu
Krosno	2013			1300	6,8 (woda 60/80°C)	Ciepło miejskie
Gdańsk	2013			950	4,15 (woda 60/90°C)	Suszenie słoju
Żychlin	2015			220	1,238 (woda 70/90°C)	Ciepło miejskie, IMP PAN
Lębork	W trakcie realizacji			1278	5,6 (woda 65/80°C)	Ciepło miejskie
Kaliska	W trakcie realizacji			995	4,1 (woda 65/85°C)	Suszenie drewna
Żory	W trakcie realizacji			600	3,34 (woda 60/90°C)	Ciepło miejskie

Tabela 5 Oferta wybranych producentów jednostek ORC (na podstawie [32, 34, 35, 44, 45])

Producent	Model	Moc elektryczna [kWe]	Temperatura zasilania [°C]	Sposób chłodzenia	Moc cieplna [MWt]	Temperatura wody chłodzącej [°C]	Sprawność netto [%]	Czynnik roboczy	Rozprężarka
Electratherm	4400	do 65	77-116	Woda lub powietrze	0,38-0,795	do 65	-	R245fa	Śrubowa
	4200	do 35	77-116	Woda lub powietrze	0,3-0,6	do 65	-	R245fa	Śrubowa
Enogia	ENO-10LT	10	80-120	Woda	-	10-30	5-8	R245fa (134a opcja)	-
	ENO-20LT	20	80-120	Woda	-	10-30	5-8	R245fa (134a opcja)	-
	ENO-40LT	40	80-120	Woda	-	10-30	5-8	R245fa (134a opcja)	-
	ENO-100LT	100	80-120	Woda	-	10-30	5-8	R245fa (134a opcja)	-
E-rational	40FT	220-800	85-100	Woda lub powietrze	-	do 60	-	R245fa Solkatherm	Śrubowa
	20FT	110-400	85-150	Woda lub powietrze	-	do 60	-	R245fa Solkatherm	Śrubowa
	10FT	55-185	85-150	Woda lub powietrze	-	do 60	-	R245fa Solkatherm	Śrubowa
Triogen	E-Box 170 Power	170	350-530 (gaz)	Woda	770	40/55	17,2	Toluen	Turbina
	E-Box 170 CHP	170	350-530 (gaz)	Woda	770	65/80	14,6	Toluen	Turbina
	E-Box 100 Power	100	350-530 (gaz)	Woda	450	40/55	15,9	Toluen	Turbina
Turboden	6/7 HR	500-800	240-300	Woda	2,0-3,5	25/35	16-19	-	-
	10 do 14 HR	900-1600	240-310	Woda	4,0-5,0	25/35	16-21	-	-
	18 do 24 HR	1700-2500	240-310	Woda	6,0-9,5	25/40	16-21	-	-
	27 do 40 HR	2600-4500	250-315	Woda	10,0-17,5	20/45	16-20	-	-
	50 do 100 HR	4800-10500	240-310	Woda lub powietrze	19,2-40,0	25/40	16-21	-	-
	2 CHP	200	226/209	Woda	1,4	75/90	12,3	-	-
	3 CHP	300	310/227	Woda	1,5	75/95	16,3	-	-
6 do 30 CHP	643-3143	300/240	Woda	2,66-14,5	60/80 lub 60/90	19	-	-	

5. PODSUMOWANIE

Instalacje pracujące w oparciu o organiczny obieg Rankine'a (ORC) to niekonwencjonalne i obiecujące metody produkcji energii elektrycznej pozwalające na wykorzystanie ciepła niskotemperaturowego pochodzącego z procesów przemysłowych czy odnawialnych źródeł energii. Ciągłe zwiększanie zapotrzebowania na energię elektryczną w połączeniu z coraz bardziej rygorystycz-

nyimi wymaganiami środowiskowymi powoduje wzrost zainteresowania tą technologią. Mimo że nazywana jest ona dojrzałą, to nadal wymaga wielu badań, dzięki którym mogłaby konkurować pod względem ekonomicznym z konwencjonalnymi metodami wytwarzania energii. W artykule tym starano się przybliżyć podstawowe zagadnienia związane z instalacjami ORC, zwracając szczególną uwagę na źródła ich zasilania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bao J., Zhao L., A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24/2013, 325-342.
- [2] Barbier E., Geothermal energy technology and current status: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6/2002, 3-65.
- [3] Brückner S., Liu S., Miró L., Radspieler M., Cabeza L. F., Lävemann E., Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy*, 151/2015, 157-167.
- [4] Bujalski W., Futyma K., Grzebielec A., Milewski J., Kucowski J., Rudowicz Z., Rusowicz A., Analiza czynników niskowrzących do rozprężania w cylindrze z tłokiem hydraulicznym, *Chłodnictwo*, LI(11)/2016, 16-19.
- [5] Chaczykowski M., Papierowska E., Wykorzystanie technologii ORC w celu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 61/2013, 336-347.
- [6] Chen H., Goswami Y., Stefanakos E. K., A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14/2010, 3059-3067.
- [7] Chmielniak T., *Technologie energetyczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [8] Chys M., van den Broek M., Vanslambrouck B., De Paepe M., Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles, *Energy*, 44/2012, 623-632.
- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- [10] Geothermal Energy Association: 2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report, March 2016.
- [11] Grzebielec A., Pluta Z., Ruciński A., Rusowicz A., *Czynniki chłodnicze i nośniki energii*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2011.
- [12] Hærving J., Sørensen K., Condra T. J., Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery, *Energy*, 96/2016, 592-602.
- [13] He C., Liu C., Zhou M., Xie H., Xu X., Wu S., A new selection principle of working fluids for subcritical organic Rankine cycle coupling with different heat sources, *Energy*, 68/2014, 283-291.
- [14] Heberle F., Preißinger M., Brüggemann D., Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources, *Renewable Energy*, 37/2012, 364-370.
- [15] Hung T. C., Wang S. K., Kuo C. H., Pei B. S., Tsai K. F., A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources, *Energy*, 35/2010, 1403-1411.
- [16] International Energy Agency: *Key World Energy Statistics*, 2016.

- [17] Kajurek J., Rusowicz A., Grzebielec A., Bujalski W., Futyma K., Szczęśniak A., Rudowicz Z., Wpływ właściwości czynnika roboczego na pracę organicznego obiegu Rankine'a, *Rynek Energii*, 129(2)/2017, 68-79.
- [18] Lecompte S., Huisseune H., van den Broek M., Vanslambrouck B., De Paepe M., Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47/2015, 448-461.
- [19] Liu B. T., Chien K. H., Wang C. C., Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery, *Energy*, 29/2004, 1207-1217.
- [20] Liu Q., Duan Y., Yang Z., Effect of condensation temperature glide on the performance of organic Rankine cycles with zeotropic mixture working fluids, *Applied Energy*, 115/2014, 394-404.
- [21] Maizza V., Maizza A., Working fluids in non-steady flows for waste energy recovery systems, *Applied Thermal Engineering*, 7/1995, 579-590.
- [22] Quoilin S., van den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V., Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22/2013, 168-186.
- [23] Rahbar K., Mahmoud S., Al-Dadah R. K., Moazami N., Mirhadizadeh S. A., Review of organic Rankine cycle for small-scale applications, *Energy Conversion and Management*, 13/2017, 135-155.
- [24] Schuster A., Karellas S., Kakaras E., Spliethoff A., Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications, *Applied Thermal Engineering*, 29/2009, 1809-1817.
- [25] Tchanche B. F., Lambrinos G., Frangoudakis A., Papadakis G., Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15/2011, 3963-3979.
- [26] Tchanche B. F., Pétrissans M., Papadakis G., Heat resources and organic Rankine cycle machines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39/2014, 1185-1199.
- [27] Vélez F., Segovia J. J., Martín M. C., Antolín G., Chejne F., Quijano A., A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16/2012, 4175-4189.
- [28] Wang D., Ling X., Peng H., Liu L., Tao L., Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation, *Energy*, 50/2013, 343-352.
- [29] Wolf N., Gabby A., Sarulla 330 MW Geothermal Project Key Success Factors in Development, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- [30] Zhai H., An Q., Shi L., Lemort V., Quoilin S., Categorization and analysis of heat sources for organic Rankine cycle systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64/2016, 790-805.
- [31] Strona internetowa: www.adoratec.com
- [32] Strona internetowa: www.electratherm.com
- [33] Strona internetowa: www.enertime.com
- [34] Strona internetowa: www.enogia.com
- [35] Strona internetowa: www.e-rational.net
- [36] Strona internetowa: www.exergy-orc.com
- [37] Strona internetowa: www.gmk.info
- [38] Strona internetowa: www.kaishantechnologies.com
- [39] Strona internetowa: orc-world-map.org
- [40] Strona internetowa: www.oramat.com
- [41] Strona internetowa: www.ozcsa.pl
- [42] Strona internetowa: www.polytechnik.com.pl
- [43] Strona internetowa: www.powergen.gepower.com
- [44] Strona internetowa: www.triogen.nl
- [45] Strona internetowa: www.turboden.eu
- [46] Strona internetowa: www.pw.utc.com