

Obiegi hybrydowe wykorzystujące odnawialne źródła energii

Potencjalny kryzys energetyczny i aspekty środowiskowe skłaniają do poszukiwania alternatywnych źródeł energii. Duże nadzieje pokłada się w źródłach odnawialnych. Ich zróżnicowanie wymaga jednak dostosowania odpowiednich technologii i sposobów eksploatacji. Pomimo oczywistych korzyści wykorzystania energii odnawialnej czynnikiem demotywującym potencjalnych inwestorów są z reguły znaczne koszty wstępne. Dlatego też dąży się do możliwie najefektywniejszego i kompleksowego korzystania z różnych typów zasobów.

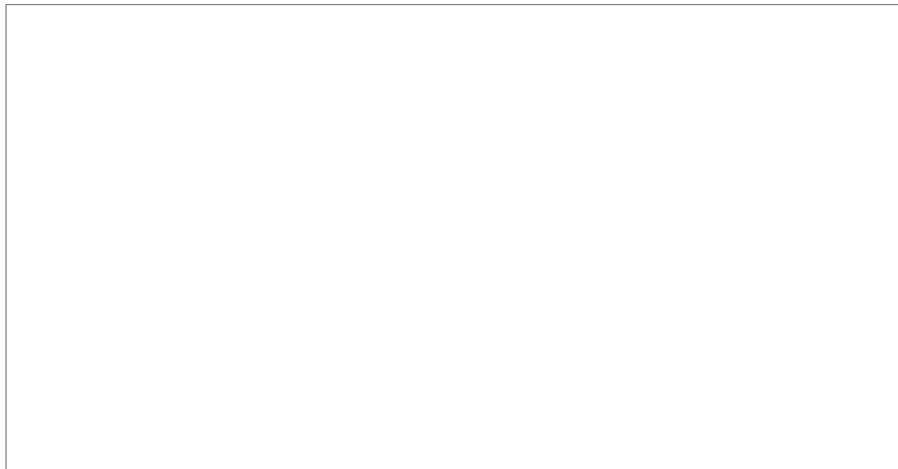
Idea obiegu hybrydowych polega na połączeniu ze sobą dwóch lub więcej źródeł energii. Rozwiązanie takie daje kilka niepodważalnych zalet. Jedną z nich jest podniesienie sprawności wykorzystania źródeł w stosunku do sytuacji, gdyby dla każdego z nich zastosowano osobny układ. Koncentracja kilku rodzajów źródeł w jednej lokalizacji powoduje, że cały projekt ma szansę stać się względnie tańszy.

Podstawową wadą, którą można przytoczyć jest wyższy poziom skomplikowania układu i potencjalne problemy w jego kontrolowaniu. Źródła mogą się znacznie od siebie różnić ze względu na stabilność pracy, moc, temperatury itd.

W artykule przedstawiono przykłady hybrydowych, parowych (pracujących za równo na parze wodnej jak i na czynnikach organicznych) obiegu opartych na OZE oraz podjęto próbę ich analizy ze względu na produkowaną moc elektryczną.

Rozważane źródła energii odnawialnej.

Na rys. 1 przedstawiono diagram klasyfikujący źródła odnawialne ze względu na ich pochodzenie.



Rys. 1 Klasyfikacja OZE^[1].

Zgodnie z przedstawionym schematem, większość OZE pochodzi z energii słonecznej, niektóre bazują na jej bezpośrednim wykorzystaniu, a niektóre są jej inną formą (np. energia wiązań chemicznych biomasy powstałych w procesie fotosyntezy)^[1].

Nie wszystkie OZE są w stanie stworzyć obieg parowy. Postacie OZE rozważane w niniejszym opracowaniu obejmują: biomasę, geotermię oraz ciepłą energię słoneczną wykorzystywaną bezpośrednio. Sklasyfikowano je ze względu na ich temperaturę.

1. Źródła niskoentalpowe - temperatury do 100°C.

Do tej kategorii zaliczono niskoentalpowe źródła geotermalne. Zasoby geotermalne na terenach pozatektonicznych są duże^[5], jednakże na dostępnych głębokościach większość z nich to właśnie źródła niskoentalpowe. Przykładem wykorzystania takiego źródła może być elektrownia w Neustadt-Glewe (Niemcy). Górna temperatura źródła to 98°C, natomiast produkowana moc elektryczna netto wynosi 210 kW^[3].

Zasadniczym problemem w przypadku źródeł niskoentalpowych jest niska sprawność termodynamiczna obiegów. Nie jest ona rezultatem problemów technologicznych, lecz jest fizycznie ograniczona. Wynika to z drugiej zasady termodynamiki^[2]. Z tego powodu produkcja energii elektrycznej ze źródeł niskoentalpowych jest często kwestionowana. Jednakże, z ekonomicznego punktu widzenia, to nie sprawność termodynamiczna jest najbardziej istotna. Jeśli dostępne jest niskoentalpowe źródło, którego eksploatacja jest stosunkowo łatwa, a jego moc jest znaczna, wtedy produkcja energii elektrycznej bywa ekonomicznie uzasadniona. Najjaskrawszym przykładem obiegów o bardzo niskich sprawnościach są elektrownie maretermiczne (oceanotermiczne). Wykorzystują one różnicę temperatur pomiędzy ciepłymi warstwami na powierzchni oceanów, a zimnymi warstwami położonymi głębiej^[4]. Właściwie jedyną efektywną metodą produkcji energii elektrycznej ze źródeł niskoentalpowych jest wykorzystanie obiegów binarnych, pracujących na czynnikach niskowrzących (ORC). Praca na parze wodnej wiązałaby się z bardzo niskim ciśnieniem w skraplaczu, a także z dużym rozmiarem turbiny^[1].

2. Źródła średnioentalpowe - temperatury od 100°C do 200°C.

Do tego przedziału kwalifikują się następujące rodzaje źródeł:

- geotermalne wody przegrzane^[6]
- niektóre rodzaje biomasy – np. słoma
- średniotemperaturowe kolektory słoneczne^[8]

Średnioentalpowe źródła geotermalne wykorzystuje się tak samo, jak te niskoentalpowe. Obiegi różnią się od siebie rodzajem czynnika (inne temperatury krytyczne) oraz turbinami. Im wyższe parametry źródła tym większa ilość stopni turbinowych, co ma także wpływ na wielkość turbiny oraz stopień skomplikowania jej konstrukcji.

Przykładem biomasy, którą można zakwalifikować do tej kategorii jest słoma. W konwencjonalnych elektrowniach dąży się do tego, aby spalać paliwo w jak najwyższej temperaturze. Zapewnia to wyższą sprawność ogólną obiegu, co wiąże się z większą ilością wyprodukowanej energii elektrycznej oraz z większymi zyskami. Niestety, spalanie słomy w wysokiej temperaturze sprawia zasadnicze problemy. Słoma zawiera wiele chlorowców, które powodują lub przyspieszają korozję powierzchni mających wysoką temperaturę. Temperatury topnienia i mięknięcia popiołu ze słomy są stosunkowo niskie ze względu na dużą zawartość metali alkalicznych. W wyniku tego mogą występować kłopoty ze szlaką^[7]. Problemy te powodują, że technologicznie kłopotliwe może być spalanie słomy w kotłach parowych. Zastosowanie znajdują tutaj kotły wodne, które dają temperaturę na wyjściu w granicach 100 °C -150 °C oraz kotły parowe pracujące na czynnikach niskowrzących.

Temperatury tego samego rzędu mogłyby zostać uzyskane również poprzez próżniowe, średniotemperaturowe kolektory słoneczne. Idea wspomaganie obiegu obiegu ORC kolektorami słonecznymi jest w fazie analizy. W ich przypadku pojawia się problem niestabilności pracy (pory roku, pogoda), który utrudniałby kontrolę i regulację obiegu, a także mógłby spowodować nagłą nadwyżkę lub deficyt energii elektrycznej.

3. Źródła wysokoentalpowe - temperatury powyżej 200°C.

We wszystkich silnikach cieplnych, spalinowych, turbospalinowych, parowych itd., dąży się do maksymalizacji górnej temperatury źródeł ciepła. Ma to kluczowy wpływ na sprawność cieplną obiegów. Nie zawsze jest to technologicznie możliwe, tak jak np. w przypadku słomy. Jednak, jeżeli jest możliwość uzyskania wysokiej temperatury, należy do tego dążyć. Wysokie temperatury mogą być uzyskane z następujących OZE:

- biomasa (np. drewno)
- wysokotemperaturowe kolektory słoneczne oparte na zwierciadłach parabolicznych^[9]
- wysokoentalpowe źródła geotermalne

Biomasa w postaci drewna może być spalana w bardzo wysokiej temperaturze, co daje możliwość wykorzystania jej w wysokotemperaturowych kotłach parowych. Przykładem dużej elektrowni

opalaną drewnem jest Steven's Croft Power Station (W. Brytania). Osiąga moc 44 MW, co udowadnia, że drewno jest atrakcyjnym OZE^[10].

Wysokotemperaturowe kolektory słoneczne pozwalają mocno skoncentrować ciepło uzyskane z promieni słonecznych. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie znacznych temperatur i pary mocno przegrzanej. Sprawność cieplna takiego obiegu byłaby dużo wyższa niż w przypadku zastosowania kolektorów średnitemperaturowych, co stawia pod znakiem zapytania opłacalność tych ostatnich. Zasada działania kolektorów wysokotemperaturowych polega na zastosowaniu zwierciadeł parabolicznych, które ogniskują promienie słoneczne^[9].

Wysokoentalpowe źródła geotermalne dostępne są w postaci pary przegrzanej bezpośrednio z odwiertu. Występują one na terenach tektonicznych, więc nie są dostępne na obszarze Polski i nie będą tutaj omawiane.

Przykłady obiegów hybrydowych.

W tej części zaprezentowano przykłady połączenia ze sobą różnych odnawialnych źródeł energii.

Ponadto oszacowano moce elektryczne tak, aby możliwe było porównanie poszczególnych układów. Jako źródło niskoentalpowe przyjęto wodę geotermalną o temperaturze 70°C i strumieniu objętości 120m³/h (co odpowiada strumieniowi masy 33.3 kg/s). Źródłem średnioentalpowym była biomasa w postaci słomy o założonej mocy cieplnej równej 2178 kW. Przyjęto, że słoma jest spalana w kotle wodnym, który na wyjściu osiąga temperaturę równą 110°C, lub w parowym kotle odparowującym czynnik organiczny. Jako źródło wysokoentalpowe przyjęto drewno o mocy cieplnej takiej samej jak w przypadku słomy (czyli 2178 kW) przy założeniu, że jest ono spalane w kotle parowym, osiągającym temperaturę 280°C przy ciśnieniu 14 bar(a).

W symulacjach poszczególnych obiegów przyjęto takie same sprawności izentropowe turbin ($\eta = 0.78$) oraz założono brak przechłodzenia czynnika w skraplaczu. Założono także izentropowy charakter sprężania czynnika w pompach obiegowych.

W przypadku wszystkich wymienników przyjęto stałą wartość „pitch-point” równą 3°K, która w rzeczywistości także może być inna, ale zastosowana konsekwentnie dla wszystkich obiegów da wyniki poprawne jakościowo. Temperatura skroplin w symulacjach wynosiła 20°C.

Na rys. 2 przedstawiono obieg wodny zasilany wodą geotermalną oraz kotłem niskotemperaturowym. Przyjęto, że maksymalna temperatura w tym obiegu wynosi 110°C. Obieg wodny zasilą obieg właściwy (ORC), który produkuje moc elektryczną. Moc maksymalna tego obiegu jest równa 353,1 kW.

Rys. 2 Układ hybrydowy zasilany energią geotermalną oraz energią z biomasy. OW – odwiert wydobywczy, OZ – odwiert zatłaczający,

WP – wymiennik ciepła (parownik), TORC – turbina, G – generator elektryczny, SK – skraplacz, PC – pompa czynnika, WW – wymiennik woda geotermalna – woda obiegowa, PW – pompa wody obiegowej.

Przekroje kontrolne: G1 – woda geotermalna na wlocie do wymiennika, G2 – woda geotermalna na wylocie z wymiennika, 1 – para nasycona opuszczająca parownik i kierowana na turbinę, 2 – para opuszczająca turbinę i kierowana na skraplacz,

3 – skroplony czynnik, 4 – ciecz sprężana do ciśnienia pary nasyconej, W1 – woda obiegowa na wylocie z kotła, W2 – woda obiegowa na wylocie z parownika, W3 – woda obiegowa na wylocie z wymiennika.

Interesującym przykładem obiegu hybrydowego jest układ, w którym parownik (wymyennik cieczy niskowrzącej) odparowuje częściowo ciecz, tzn. do określonego stopnia suchości. Następnie kocioł parowy osusza parę do punktu nasycenia. Schemat takiego obiegu przedstawiono na rys. 3. To rozwiązanie jest zauważalnie efektywniejsze od rozwiązania zaprezentowanego na rys. 2. Maksymalna moc uzyskana w tym wariantcie wynosi 392,3 kW.

Rys. 3 Schemat obiegu z niskotemperaturowym kotłem parowym pracującym w obiegu ORC.

Symbole: OW – odwiert wydobywczy, OZ – odwiert zatłaczający, W – wymiennik ciepła (parownik), K – kocioł parowy, TORC – turbina, G – generator elektryczny, SK – skraplacz,

PC – pompa czynnika. Przekroje kontrolne: G1 – woda geotermalna na wlocie do parownika, G2 – woda geotermalna na wylocie z parownika, 1 – para nasycona opuszczająca kocioł i kierowana na turbinę, 2 – para opuszczająca turbinę i kierowana na skraplacz, 3 – skroplony czynnik, 4 – ciecz sprężana do ciśnienia pary nasyconej 5 – częściowo odparowany czynnik kierowany do kotła osuszającego.

Dwa pierwsze obiegi hybrydowe były połączeniem źródeł niskoentalpowego i średnioentalpowego. W rozwiązaniu zaproponowanym na schemacie z rys. 4 połączono źródło niskoentalpowe i wysokoentalpowe. Niewielka część strumienia masy wody geotermalnej jest wykorzystana na

wstępne podgrzanie wody opuszczającej skraplacz w obiegu parowym.

Rys. 4 Rozdzielone obiegi pary wodnej i ORC ze wstępnym podgrzaniem wody. Symbole: OW – odwiert wydobywczy, OZ – odwiert zatłaczający, WW – wymiennik woda – woda geotermalna, WP – parownik, PC – pompa skroplonego czynnika, SK1 – skraplacz w obiegu ORC, TORC – turbina na czynnik niskowrzący, PW – pompa skroplonej wody, SK2 – skraplacz dla obiegu wysokotemperaturowego, TP – turbina na parę wodną, K – kocioł parowy, G – generator. Przekroje kontrolne: G1 – gorąca woda geotermalna, G2 – część wody geotermalnej kierowanej do parownika, G3 – część wody geotermalnej na wylocie z parownika, G4 – część wody geotermalnej kierowana na wymiennik, G5 – część wody geotermalnej na wylocie z wymiennika, G6 – schłodzona woda geotermalna kierowana do odwiertu, 1 – nasycona para czynnika niskowrzącego, 2 – para czynnika rozprężona w turbinie, 3 – skropliny czynnika, 4 – skropliny sprężone do ciśnienia P1, W1 – przegrzana para wodna kierowana na turbinę, W2 – para wodna rozprężona w turbinie, W3 – skroplona woda, W4 – woda sprężona do ciśnienia PW1, W5 – wstępnie ogrzana woda kierowana do kotła.

Rysunek 5 przedstawia obiegi pary wodnej oraz obieg ORC połączone wymiennikiem ciepła. Wymiennik jest jednocześnie skraplaczem dla obiegu pary wodnej oraz parownikiem dla obiegu ORC. Należy tutaj zaznaczyć, że parownik ten nie odparowuje czynnika od stanu wrzenia (ponieważ nie wystarczyłoby energii cieplnej biomasy) lecz od pewnego stopnia wilgotności np. $x_1 = 0.5$ do $x_2 = 1.0$. Pozwala to na optymalne wykorzystanie ciepła geotermalnego. Ponieważ dla założonych parametrów para wodna na wylocie z turbiny jest wilgotna, wymiennik będzie pracował przy stałych temperaturach na całej swojej długości.

Rys. 5 Sprzężony obieg wodny oraz ORC ze wstępnym podgrzaniem wody kierowanej do kotła parowego. Symbole: OW – odwiert wydobywczy, OZ – odwiert zatłaczający, WW – wymiennika ciepła woda obiegowa – woda geotermalna, WP – parownik, PC – pompa czynnika niskowrzącego, SK1 – skraplacz dla obiegu ORC, SK2 – parownik-skraplacz, PW – pompa wody obiegowej, TORC – turbina na czynnik niskowrzący, TP – turbina na parę wodną, K – wodny kocioł parowy, G – generator. Przekroje kontrolne: G1 – gorąca woda geotermalna, G2 – część wody geotermalnej kierowana do parownika, G3 – część wody geotermalnej na wylocie z parownika, G4 – część wody geotermalnej kierowana na wymiennik woda geotermalna – woda obiegowa, G5 – woda geotermalna na wylocie z wymiennika, G6 – schłodzona woda geotermalna kierowana do odwiertu, 1 – wilgotna para czynnika niskowrzącego kierowana na parownik-skraplacz, 2 – nasycona para czynnika niskowrzącego kierowana na turbinę, 3 – rozprężona para czynnika, 4 – skroplony czynnik niskowrzący, 5 – czynnik niskowrzący sprężony do ciśnienia P2. W1 – woda obiegowa ogrzana w wymienniku, W2 – przegrzana para wodna kierowana na turbinę, W3 – rozprężona para wodna, W4 – skroplona para wodna, W5 – woda sprężona do ciśnienia P2.

Układ z rys. 5 jest technologicznie znacznie bardziej kłopotliwy od układu z rys. 4, z uwagi na problemy z transportem bardzo mokrej pary z jednego wymiennika do drugiego. Z drugiej strony, turbina parowa w układzie z rys. 5 nie rozpręża pary wodnej do tak niskiego ciśnienia, a w związku z tym będzie maszyną o mniejszej liczbie stopni.

Maksymalne moce układów z rysunków 4 i 5 są porównywalne i wynoszą odpowiednio: 823,7 kW dla oraz 822,8 kW. Rozważono również sytuację, w której oba źródła (niskoentalpowe i wysokoentalpowe) pracują osobno. Okazuje się, że ich sumaryczna moc wyniosłaby 787,4 kW, co pokazuje, że w tym przypadku zastosowanie obiegów hybrydowych ma wpływ na poprawę sprawności.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano zalety i wady zastosowania obiegów hybrydowych. Pokazano, że mogą one przynosić dodatkową korzyść sprawnościową. Wadą takich rozwiązań jest wyższy stopień skomplikowania i potencjalne problemy związane z kontrolowaniem takich układów. Zasadność ich zastosowania będzie zależała od warunków konkretnej lokalizacji i parametrów źródeł.

Bibliografia:

- [1] Klonowicz P., Computational Algorithm for Low Enthalpy Power Plant Cycles, praca magisterska, Politechnika Łódzka, 2007.
- [2] Wiśniewski S. Termodynamika Techniczna, WNT, Warszawa 1987
- [3] Hanausek P., Klonowicz P., Krysiński J. Koncepcja hybrydowej siłowni geotermalnej w Uniejowie. Przegląd Geologiczny, vol 57, nr 8, 2009, str. 654-655
- [4] http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_maretermiczna
- [5] Ney R., Sokołowski J. Wody geotermalne Polski i możliwości ich wykorzystania, Nauka Polska, nr 6, 1987.
- [6] Sokołowski J. Definicje pojęć określających warunki występowania zasobów energii geotermicznej i geotermalnej Materiały Polskiej Szkoły Geotermalnej. III Kurs. Wyd. Sigmie PAN, Kraków, 1997.
- [7] http://www.kape.gov.pl/EN/Achievements/Programmes/ProgrammesInternational/1996_2000_a/pliki/sloma/sloma_2.htm
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_Solar_Power
- [10] <http://www.scotland.gov.uk/News/Releases/2008/03/19100>