

POPRAWA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH POPRZEZ ZASTOSOWANIE UKŁADU ORC

Jacek TOMASIAK, Jerzy DUDA

Streszczenie: Entalpia procesowych gazów odlotowych jest najczęściej przyczyną niskiej sprawności procesów cieplnych. W artykule przedstawiono rozważania nad koncepcją poprawy efektywności energetycznej procesu technologicznego na przykładzie przedsiębiorstwa z branży spożywczej. Proponowana instalacja odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego oparta jest na organicznym cyklu Rankine'a. Zaproponowany układ opiera się na skojarzeniu procesu technologicznego z układem ORC (Organic Rankine'a Cycle). Stwarza to możliwość wytwarzania „czystej” energii elektrycznej i ciepła, a przez to ogranicza emisje szkodliwych gazów i zmniejsza energochłonność procesów.

Słowa kluczowe: energia elektryczna, czynnik organiczny, kogeneracja, ORC

1. Wprowadzenie

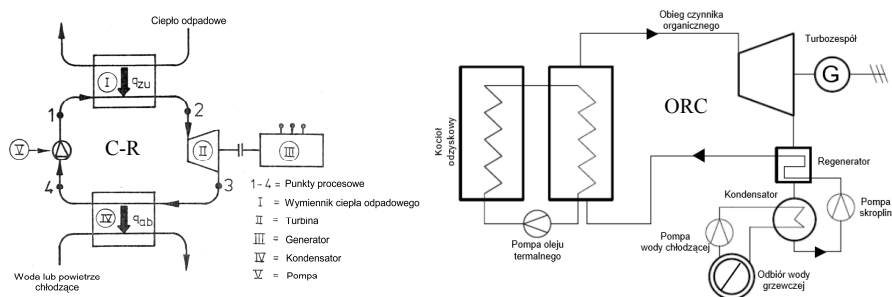
Wraz z rozwojem cywilizacyjnym wzrasta zapotrzebowanie na energię, przy wyczerpywaniu się jej tradycyjnych zasobów – głównie paliw kopalnych a towarzyszący ich zużyciu wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego, powodują zwiększenie zainteresowania wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych. Wykorzystywanie OZE w znacznym stopniu zmniejsza szkodliwe oddziaływanie energetyki na środowisko naturalne. Dlatego też polityka UE w strategii „Zrównoważona Europa dla lepszego świata” zobowiązuje kraje członkowskie do ograniczenia emisji z procesów spalania paliw oraz poszukiwania alternatywnych źródeł energii elektrycznej.

W celu zwiększenia efektywności energetycznej, wprowadza się „czyste” bezodpadowe technologie WHR (Waste Heat Recovery), których działanie opiera się na wykorzystywaniu procesowej entalpii odpadowej. Przykładem takiego zastosowania jest układ ORC (Organic Rankine Cycle), który daje możliwość konwersji energii cieplnej na elektryczną. Technologia ta w Polsce jest coraz bardziej popularna, a jej kluczową zaletą jest możliwość wykorzystania mediów zasilających układ o niskich temperaturach. Dodatkowo uniwersalność systemu umożliwia wykorzystanie go nie tylko w momencie dedykowanych zastosowań w układach z kotłami na biomasę bądź w układach geotermalnych, ale również przy różnych systemach odzysku ciepła odpadowego w procesach przemysłowych czy energetycznych. Dotyczy to szczególnie ciepła niskotemperaturowego.

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele typów jednostek ORC. Powstaje jednak problem w przypadku energii odpadowej niskotemperaturowej w zakresie granicy zastosowania tychże układów oraz możliwości optymalizacyjnych projektowych jednostek. [1].

2. Układ ORC

Zasada działania układu ORC opiera się na wykorzystaniu obiegu siłowni parowej, przy czym różnicę wobec konwencjonalnego układu wodno-parowego, stanowi czynnik termodynamiczny w postaci związku organicznego, np. izopentan, izobutan. Należy zatem zwiększać zainteresowanie rozwojem produkcji siłowni elektrycznych bazujących na obiegu Clasiusa-Rankine'a przy wykorzystaniu organicznego czynnika roboczego. Budowa układów ORC polega na optymalnym dobraniu cieczy organicznej zastępującej wodę oraz parę wodną, turbiny oraz ciśnień roboczych, a także powierzchni wymian ciepłych. Następnym optymalizacji tych elementów jest wprowadzanie na rynek energii odnawialnych kotłów na biomasę. Kotły na biomasę z wymiennikiem oleju termalnego dobrze współpracują z urządzeniami kogeneracyjnymi ORC, wytwarzając nie tylko energię elektryczną, ale i ciepło [1].



Rys. 1. Schemat klasycznego obiegu Rankine'a i układu ORC

Na rysunku 1. przedstawiono uproszczony schemat klasycznego układu Clausiusa-Rankine'a oraz układu ORC. W układzie ORC obieg oleju termalnego tworzy układ transportu ciepła od źródła do wymiennika głównego, czyli podgrzewacza i parownika, w którym czynnik termodynamiczny pochodzenia organicznego zostaje podgrzany i odparowywany. W ten sposób otrzymywana para doprowadzana jest do wlotu turbiny wolnobieżnej. Przepływa ona przez kanały pomiędzy łopatkowe wirnika ulegając rozprężeniu przy czym napędza ona wał turbiny oraz sprzężony z nim generator energii elektrycznej [2].

Pierwsza elektrownia z takim układem powstała w 1967 roku na Kamczatce. Była to instalacja eksperymentalna o moc 680 kWe. Zasilanie jej odbywała się przy zastosowaniu wody o temperaturze 81°C i czynnika roboczego R-12, czyli dichlorodifluorometanu będącego najczęściej stosowanym freonem o wzorze CCl_2F_2 (Freon-12). Od tego okresu zaczęto instalować na świecie obiegi ORC w elektrowniach komercyjnych. Współcześnie wraz z zastosowaniem nowych czynników roboczych zainteresowanie praktycznym zastosowaniem obiegów ORC wzrosło. W Polsce istnieją już instalacje wykorzystujące układy ORC jednak obecnie zainteresowanie znalazło głównie w ciepłownictwie. Pierwszy układ ORC zastosowano w ciepłowni w Ostrowie Wielkopolskim, gdzie wybudowano blok kogeneracyjny opalany biomasą. W ciepłowni zlikwidowano jednego kocioł węglowy i wybudowano w jego miejscu nowoczesny blok kogeneracyjny opalany biomasą z turbogeneratorem ORC. Zastosowano kocioł z obiegiem oleju termalnego, którego moc cieplna wyniosła 9 MWt, a który jest opalany odpadami drzewnymi. Kocioł ten zasil

turbogenerator ORC wytwarzający energię elektryczną, ciepło do celów grzewczych. Natomiast współcześnie budowane instalacje ORC oparte są na kotłach opalanych biomasą lub wykorzystujące entalpię ciepła procesowego, które wytwarzają moc od 400 do 1500 kW_e, przy sprawności rzędu 10-20% [4].

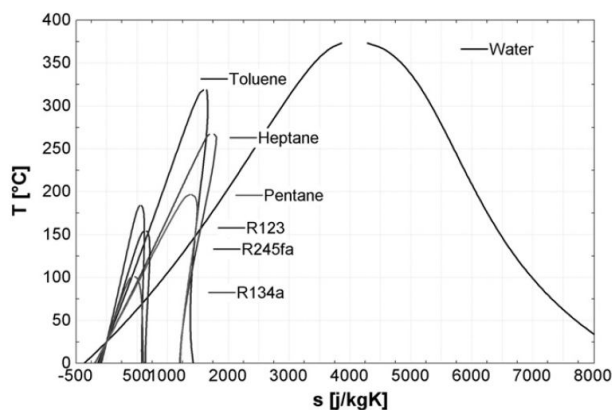
Układ ORC posiada przy tym jedną z ważniejszych zalet w zakresie eksploatacji jaką jest niska wrażliwość na zmiany obciążenia wykazując przy tym wysoką sprawność w zakresie modulowania mocy wejściowej zapewniając szeroki zakres stabilnej pracy, przy minimum technologicznym na poziomie maksymalnie 10% obciążenia nominalnego. Układy przemysłowe ORC wyposażone są w zautomatyzowane systemy rozruchu, synchronizowane z siecią przy odstawieniu turbozespołu, co zapewnia elastyczną pracę oraz wysoką dyspozycyjność. Wysoki poziom zautomatyzowania skutkuje również obniżeniem kosztów eksploatacyjnych w postaci ograniczenia do niezbędnego minimum oddziaływania czynnika ludzkiego. Sprawność nominalna wytworzenia energii elektrycznej w reaktorze ORC zapewnia wartość rzędu 20%, przy efektywności produkcji ciepła rzędu 79-80%. Dlatego urządzenia te stały się dobrymi sposobami dla zaspokojenia potrzeb energetyki rozproszonej, przy czym w Polsce, w przeciwieństwie do innych krajów Europy Zachodniej, pracuje tylko kilka takich zespołów. Wynika to z wysokich kosztów tych urządzeń.

3. Optymalizacja układów ORC

Optymalizacja układów ORC powinna dotyczyć modyfikacji użytych czynników roboczych, a w szczególności ich parametrów termodynamicznych. Zastąpienie wody czynnikiem organicznym gwarantuje wymierne korzyści, co nie ulega wątpliwości. Możliwości zastosowania różnego rodzaju cieczy organicznych są ogromne, jednak wiąże się z tym ograniczenia: wysokie koszty ich pozyskania oraz zachowanie wysokich standardów bezpieczeństwa. Jednak zakres zastosowania tych związków jest tak szeroki, że zapewnia dalsze realne możliwości optymalizowania wytwarzania energii [1].

W układach OCR szczególną uwagę zwraca się na temperaturę wrzenia i parowania cieczy. Dążąc do zmiany fazy cyklu w układach, które bazują na wysokich temperaturach roboczych wskazane są wysokie temperatury krytyczne. Oznacza to niestety niskie ciśnienie kondensacji, co generuje problemy w projekcie konstrukcyjnym turbiny i całej instalacji. Dodatkowo wysokie ciśnienie skraplania skutkuje niskimi temperaturami krytycznymi, co wpływa na zmiany właściwości termodynamicznych. Panaceum na zmiany parametrowe może być ingerowanie w budowę molekularną związku. Dążyć się przy tym powinno do uzyskania płynów o zbliżonych krzywych nasycenia, tak jak w przypadku wody. Pomimo tego, większość substancji organicznych posiada budowę cząsteczek złożonych, co zdecydowanie ogranicza ich użycie, komplikując przy tym regenerację. Kluczowe znaczenie w przypadku wyboru czynnika roboczego mają także klasa i właściwości palne oraz toksyczne. Generalnie w układach ORC najczęściej wykorzystuje się: butan, pentan, p-xylen, toluen i węglowodory fluorowane. Węglowodory te wykazują wyjątkową stabilność oraz obojętność, posiadającą skrajnie skomplikowaną budowę molekularną. Zastosowanie mają też siloksany, których wykorzystanie wydaje się interesujące ze względu na własności „mix fizyczne” i termiczne, czyli niską toksyczność oraz palność, wraz z wysoką masą cząsteczkową, możliwościami długotrwałego stosowania jako nośnika ciepła o wysokiej temperaturze. Minusem jest fakt, że często stosowane są mieszaniny, co ma wpływ na stabilność termodynamiczną, a szczególnie nieizotermiczne parowanie [3].

Na rys. 2. przedstawiono wykres fazowy T-s najczęściej wykorzystywanych węglowodorów aromatycznych będących czynnikami roboczymi siłowni ORC.



Rys. 2. Charakterystyka czynników roboczych układów ORC [6]

Optymalny dobór charakterystyki pracy czynników roboczych nie jest tylko wynikiem poprawienia parametrów układów ORC. Wybór czynnika determinowany jest zastosowaniem obiegu ORC i temperaturą dostępnego źródła ciepła [7]. Dodatkowo czynnik roboczy powinien być tani, nie powinien generować wysokich kosztów dla elektrowni, oraz powinien być „przyjazny” dla środowiska. W tabeli 1. zestawiono właściwości wody zastosowanej przy siłowni parowej oraz czynnika organicznego stosowanego w układzie ORC.

Tab. 1. Czynniki robocze stosowane w obiegu parowym i organicznym obiegu ORC [8]

| Właściwości | Obieg parowy | Organiczny obieg Rankine'a |
|-----------------------|--------------|------------------------------|
| Czynnik roboczy | woda | związek organiczny |
| Ciśnienie krytyczne | wysokie | niskie |
| Temperatura krytyczna | wysoka | niska |
| Temperatura wrzenia | wysoka | niska |
| Ciśnienie skraplania | niskie | akceptowalne |
| Pojemność cieplna | wysoka | niska |
| Lepkość | niska | wysoka |
| Palność | nie | tak, w zależności od cieczy |
| Toksyczność | nie | tak |
| Wpływ na środowisko | nie | duży, w zależności od cieczy |
| Dostępność | dostępne | problem z pozyskaniem |
| Koszt | niski | wysoki |

Wybór optymalnej cieczy organicznej dla obiegu ORC jest tematem badań termodynamicznych i fizycznych. Wynika on z pożądanych cech tych cieczy jakimi są niska temperatura krytyczna i ciśnienie, mała lepkość i napięcie powierzchniowe, duża

przewodność cieplna, odpowiednia stabilność termiczna, odporność na korozję oraz mała toksyczność. Ponadto nie powinny być zżące w stosunku do materiałów oraz smarów używanych w instalacjach ORC [9]. Do najważniejszych cech optymalnego czynnika roboczego należy niska toksyczność, kompatybilność oraz stabilność chemiczna w czasie pracy z różnymi materiałami, korozyjność, niska palność i niski potencjał rozkładu. Jednym z najlepszych czynników roboczych są czynniki chłodnicze, których oznaczenia określone są przez Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji (*American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* – ASHRAE), mają postać litery R. Jednak ze względu na środowisko niektóre czynniki zostały wycofane z użycia. Dotyczy to czynników oznaczonych kodami R-12, R-113, R-114 oraz R-115. Dodatkowo część z nich jest stosowana do roku 2020, jak np. R-21, R-22, R-123 i R-124 [10].

W przypadku siłowni ORC z mokrym czynnikiem obiegowym w wymienniku następuje w kolejności podgrzanie tego czynnika od temperatury skraplania do temperatury parowania, następnie odparowanie oraz przegrzanie. W efekcie para kierowana do turbiny dla tego układu ORC jest parą przegrzaną. Po rozprężeniu pary w turbinie kieruje się ją do skraplacza, skąd skroplony czynnik roboczy kierowany jest do wymiennika ciepła. Natomiast w układzie ORC z suchym czynnikiem obiegowym para opuszczająca wymiennik ciepła kierowana do turbiny jest parą nasyconą suchą. W wymienniku następuje jedynie podgrzanie i odparowanie czynnika obiegu ORC. W przypadku czynników suchych proces ekspansji pary w turbinie przebiega w obszarze pary przegrzanej i skutkuje to tym, że na wypływie z turbiny para czynnika charakteryzuje się wyższą temperaturą od temperatury skraplania. Dlatego do skraplacza para czynnika kierowana jest w pierwszej kolejności do wymiennika regeneracyjnego. W wymienniku tym ma miejsce podgrzanie cieczy czynnika obiegowego, opuszczającego skraplacz, przez parę przegrzaną kierowaną do tego wymiennika z turbiny [11].

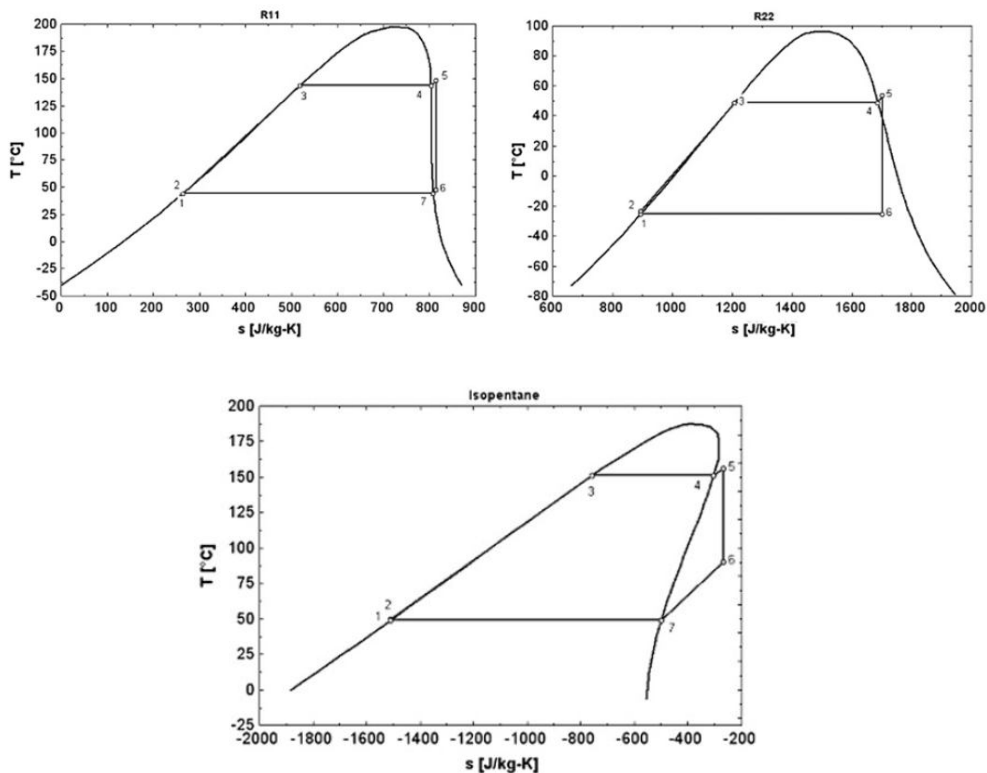
Przykładowe obiegi ORC dla suchych i mokrych czynników obiegowych przedstawiono na wykresach T-s (rys. 3).

Z analizy wynika, że znacznie korzystniej wypadają układy ORC bazujące na suchych czynnikach obiegowych, w których zastosowano wewnętrzną regenerację ciepła. W przypadku tych układów moc elektryczna była wyższa od mocy układów ORC, w których zastosowanie miały mokre czynniki obiegowe. Wpływ na uzyskiwaną moc oraz sprawność obiegu ORC ma rodzaj zastosowanego czynnika obiegowego. W przypadku analizowanych czynników suchych, z dodatkowym zastosowaniem wewnętrznej regeneracji ciepła w układzie ORC, moc elektryczna uzyskiwana dla różnych czynników obiegowych nieznacznie się od siebie różni. Stwierdza się zatem, że w przypadku czynników suchych podstawowym kryterium wyboru czynnika jest jego dostępność, cena i wpływ na środowisko naturalne, gdyż osiągnięta efektywność pracy układu ORC jest na zbliżonym poziomie [11].

Często stosuje się procedury doboru czynnika roboczego poprzez wspomaganie komputerowe na poziomie projektowania molekularnego. To podejście pozwala przypisać czynnikom roboczym miary dla czterech podstawowych kategorii wynikających z termodynamiki, środowiska, bezpieczeństwa oraz procesów [12].

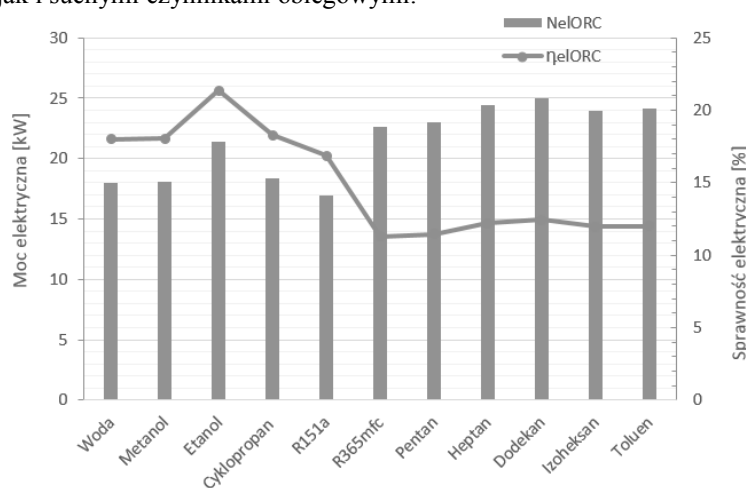
Dodatkowo ważnym aspektem wpływającym na efekt końcowy jest osiągnięcie minimalnej temperatury obiegu chłodzącego, właściwego przepływu obiegu zasilającego bądź odpowiedniego poziomu regeneracji dotyczącej cieczy roboczej. Ostatnią ważną płaszczyzną możliwości maksymalizacji w produkcji energii elektrycznej bądź obniżenia parametrów wejściowych są zmiany w obrębie wielkości podstawowych urządzeń, takich

jak parownik, regenerator, kondensator, czy wreszcie zoptymalizowanie i dobranie najważniejszego elementu jakim jest turbina.



Rys. 3. Porównanie mokrych i suchych czynników organicznych na wykresie T-s [11]

Na rys. 4. przedstawiono wyniki analiz efektywności pracy układów ORC zarówno z mokrymi jak i suchymi czynnikami obiegowymi.



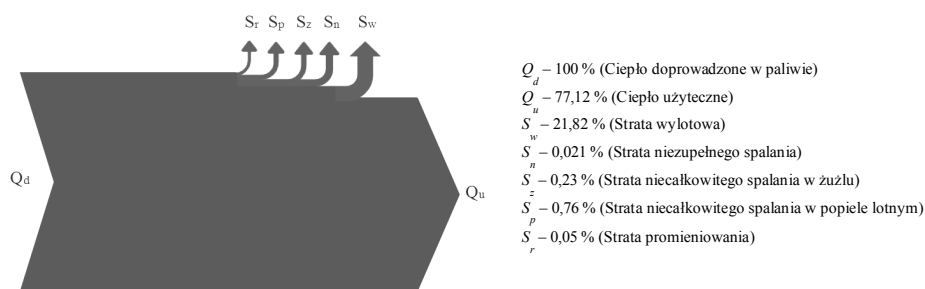
Rys. 4. Wpływ rodzaju czynnika na moc i sprawność elektryczną układu ORC

Poprawny dobór czynnika roboczego do konkretnej realizacji układu ORC ma decydujące znaczenie dla osiągnięcia odpowiedniej sprawności układu a w konsekwencji do uzyskania odpowiednio wysokich zysków z jego funkcjonowania.

4. Koncepcja instalacji odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego

Zalecenia UE zawarte w pakiecie klimatyczno-energetycznym (3 x 20%) zobowiązują kraje członkowskie do 2020 r. ograniczyć emisję gazów cieplarnianych oraz zwiększyć udział energii ze źródeł odnawialnych. Dlatego też w artykule zaproponowano koncepcję instalacji układu ORC w przedsiębiorstwie z branży spożywczej gdzie do procesu technologicznego wykorzystuje się parę wodną. Do wytworzenia pary technologicznej wykorzystuje się pięć kotłów parowych ER 125 o nominalnej mocy 2,4 MW.

Pierwszym etapem badań było wykonanie bilansu cieplnego kotłowni i określenie ilości ciepła odpadowego z kotła (entalpi gazów odlotowych). Do sporządzenia bilansu cieplnego wybrano metodę pośrednią zwaną metodą określenia strat. Polega ona na obliczeniu wszystkich strat ciepła i strumienia energii zawartej w paliwie. Obliczenia wykonano dla jednego z kotłów z uwagi na podobne parametry pracy. Wyniki badań przedstawiono na wykresie Sankey'a (rys. 5).



Rys. 5. Graficzne przedstawienie bilansu - wykres Sankey'a

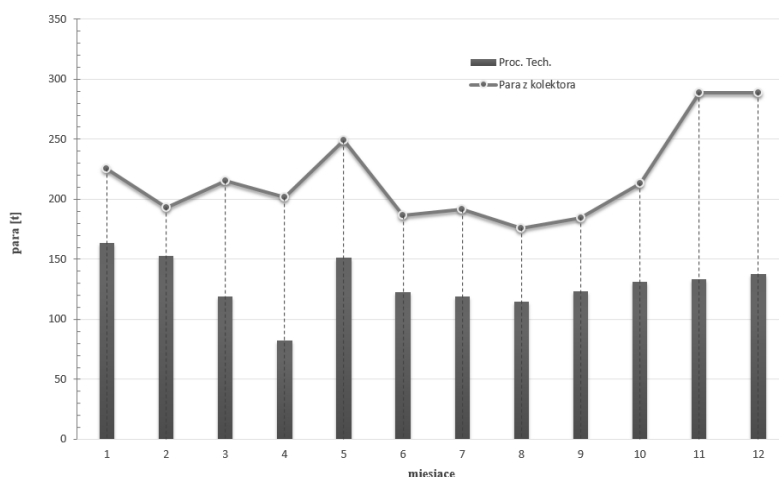
Z przedstawionego wykresu wynika, że strata wylotowa sięga do około 22%, dodatkowo zbyt duża nadprodukcja pary w stosunku do zapotrzebowania, również generuje dodatkowe straty. Na rys. 6. przedstawiono analizę produkcji pary w skali roku do zapotrzebowania procesu technologicznego.

Zebrane dane pozwoliły zaproponować różne warianty instalacji odzysku ciepła. Pierwszy wariant przewidywał modernizację jednego kotła polegającą na przystosowaniu go do spalania biomasy oraz wymiany czynnika roboczego (wody) na olej termalny, który stanowiłby źródło ciepła dla jednostki kogeneracyjnej pracującej w technologii ORC. Schemat instalacji pokazano na rys. 7.

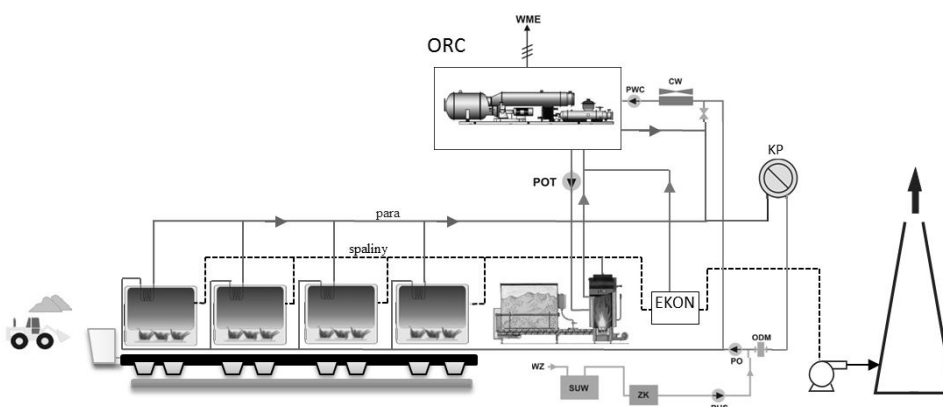
Kolejne rozwiązanie zakładało wyeliminowanie jednego kotła parowego i wykorzystanie ciepła z procesu spalania oraz dodatkowego ciepła kondensatu pary wodnej do nadbudowy procesu układem kogeneracyjnym ORC (rys. 8).

Trzeci wariant zakładał modyfikację pierwszego polegającą na zgazowaniu biomasy. Uzyskany w ten sposób gaz z powodzeniem można wykorzystać do zasilania układu turbiny gazowej. Obecnie na świecie funkcjonuje wiele instalacji zgazowania paliw, jednak w przeważającej części są to instalacje, które jako paliwo wykorzystują węgiel lub ropę naftową. Zasada pracy takiego układu polega na przesłaniu otrzymanego gazu do komory

spalania zespołu turbiny gazowej. Następnie spaliny zostają rozprężone w turbinie gazowej i kierowane są do wymiennika ciepła układu ORC. W wymienniku tym energia cieplna spalin przekazywana jest do czynnika organicznego układu ORC.



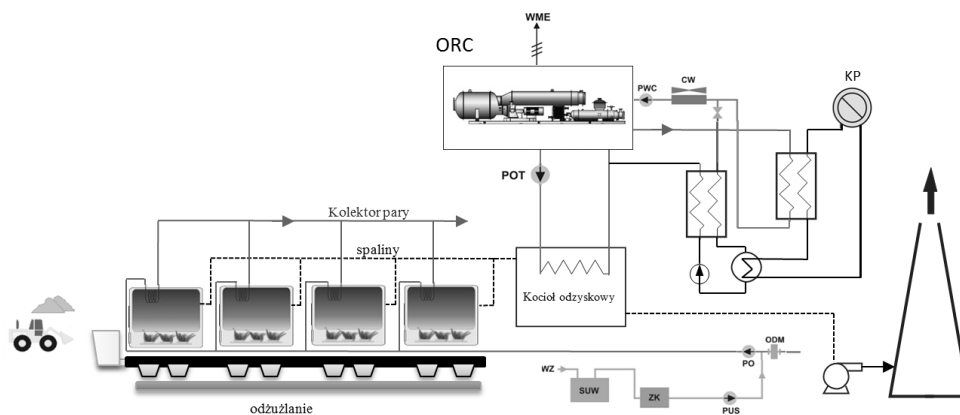
Rys. 6. Ilość wykorzystanej pary technologicznej w odniesieniu do całkowitej produkcji pary



Rys. 7. Schemat instalacji ORC z wykorzystaniem kotła do spalania biomasy

Zaproponowane rozwiązania mogą w znaczny sposób przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej procesów technologicznych w rozpatrywanym przedsiębiorstwie. Jednak na wybór optymalnego rozwiązania ma wpływ wiele czynników. W tym celu proponuje się podczas wyboru optymalnego układu kogeneracyjnego przyjąć następujące etapy projektowania:

- określenie źródeł entalpii procesowych gazów odlotowych i możliwości ich wykorzystania,
- wyznaczenie parametrów termodynamicznych entalpii procesowych gazów odlotowych,
- ocena efektywności pracy układów ORC z różnymi czynnikami organicznymi,



Rys. 8. Schemat instalacji ORC z kotłem odzyskowym i dodatkowym ciepłem kondensatu

- ocena zagrożeń wykorzystania techniki ORC,
- określenie ograniczeń wykorzystania entalpii procesowych gazów odlotowych,
- określenie sposobu zarządzania i wdrożenia innowacyjnego projektu.

Taki proces postępowania zapewni efekt ekonomiczny i ekologiczny. Jest to rozwiązanie zgodne z dyrektywami UE dotyczącymi rozwoju energetyki rozproszonej i układów kogeneracyjnych, dlatego też istnieje duża szansa na dofinansowanie projektu z funduszy unijnych, co znacznie poprawi efektywność takiej realizacji.

5. Podsumowanie

Zastosowanie nowoczesnych instalacji kogeneracyjnych w przedsiębiorstwach stwarza możliwość wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej dzięki entalpii gazów procesowych. Niskotemperaturowa technika wytwarzania energii elektrycznej w układach ORC wpływa na podniesienie efektywności systemów energetycznych, zmniejszenie zużycia paliw kopalny oraz poprawę warunków środowiska naturalnego. Odpowiedni dobór parametrów pracy układu ORC ma kluczowe znaczenie, a szczególnie duży wpływ na uzyskiwaną moc i sprawność obiegu ORC ma rodzaj zastosowanego czynnika obiegowego oraz parametry tego czynnika w obiegu ORC (temperatura odparowania, temperatura przegrzania).

Literatura

1. Papierowska E., Chaczykowski M.: Wykorzystanie technologii ORC w celu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, nr 61, 2013, s. 336-347.
2. Tomasiak J., Duda J.: Wpływ innowacyjnych technik WHR na poprawę efektywności energetycznej procesów technologicznych. [w:] Knosala R. (red.): *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, Tom I, WNT, Warszawa, 2015, s. 510-519.
3. Weisser P., Skotnicki P.: *Perspektywy wykorzystania układów ORC przy niskotemperaturowej energii odpadowej*. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Warszawa-Opole, 2010, s. 114-122.
4. Badyda K.: *Biomasa jako paliwo w małych elektrociepłowniach*. *Czysta Energia*, nr1, Stowarzyszenie Energii Odnawialnej, 2008, http://www.seo.org.pl/f_publicacje_r.php?id_pu_=17&id_c=4 dostęp: 17.01.2016.

5. Lewandowski W.M., Ryms M., Kołola R., Kubski R.: Poprawa sprawności układów ORC i systemów trigeneracyjnych poprzez zastosowanie różnych termodynamicznych wariantów ich działania. *Nafta - Gaz* 9, 2010, s. 794-799.
6. Angelino G., Colonnadi Paliano P.: Organic Rankine Cycles (ORCs) for energy recovery from molten carbonate fuel cells, 35th Intersociety Energy Conversion Engineering July 2000, Las Vegas, 2000.
7. Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W.: Maximising the working fluid flow as a way of increasing power output of geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering* no 27, 2007, s. 2074-2078.
8. 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* no 15, 2011, s. 3963-3979.
9. Maizza V., Maizza A.: Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering* no 21, 2001, s. 381-390.
10. Chen H., Goswami D.Y., Stefanakos E.K.: A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no 14, 2010, s. 3059-3067.
11. Wiśniewski S.: Chłodzenie ogniwa paliwowego typu PAFC z wykorzystaniem układu ORC z mokrymi i suchymi czynnikami obiegowymi. *Napędy i Sterowanie*, nr 9, 2014, s. 128-135.
12. Papadopoulos A.I., Stijepovic M., Linke P.: On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering* no 30, 2010, s. 760-769.

Dr hab. inż. Jerzy DUDA, prof. PWSZ w Nysie
 Mgr inż. Jacek TOMASIAK
 Instytut Zarządzania
 Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie
 48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7
 tel.: (0-77) 409 11 55
 e-mail: jerzy.duda@pwsz.nysa.pl
 jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl