

PATRYK WEISSER\*  
PAWEŁ SKOTNICKI\*\*

## Perspektywy wykorzystania układów ORC przy niskotemperaturowej energii odpadowej

Od niedawna w Polsce coraz bardziej znana jest technologia wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w tzw. układach ORC – *Organic Rankine Cycle*. Jego ideą i główną zaletą jest możliwość wykorzystania mediów zasilających układ o niskich temperaturach. Poza tym uniwersalność systemu pozwala na wykorzystaniu go nie tylko przy dedykowanych zastosowaniach w układach z kotłami na biomasę czy geotermii, ale także przy różnorodnym systemie odzysku ciepła odpadowego z procesów przemysłowych i energetycznych, szczególnie ciepła niskotemperaturowego czy energii solarnej. W obecnej chwili na rynku istnieje wiele typoszeregów jednostek ORC. Wychodząc jednak w kierunku energii odpadowej niskotemperaturowej – należy zastanowić się nad granicą stosowalności tychże układów oraz nad możliwościami optymalizacyjnymi i projektowymi jednostek.

### 1. Wprowadzenie

Bez wątpienia coraz większym problemem naszego kraju jest zapewnienie odpowiedniej produkcji i rezerwy energii elektrycznej. Niedofinansowana infrastruktura przesyłowa, przestarzałe technologie i perspektywa wprowadzenia pakietu energetyczno-klimatycznego winny być wystarczającymi powodami do bliższego zainteresowania się tematyką nowych technologii pozyskania energii elektrycznej. Strategia zrównoważonego rozwoju energetyki w krajach UE zakłada ograniczenie energetyki konwencjonalnej oraz wzrost wykorzystania OZE, uzasadnione wydaje się więc szukanie czystej energii w postaci odzysku i konwersji jej z różnego rodzaju ciepła odpadowego, na które obecnie nie zwraca się najmniejszej uwagi. Może więc najwyższy czas, aby również i tutaj spróbować

---

\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

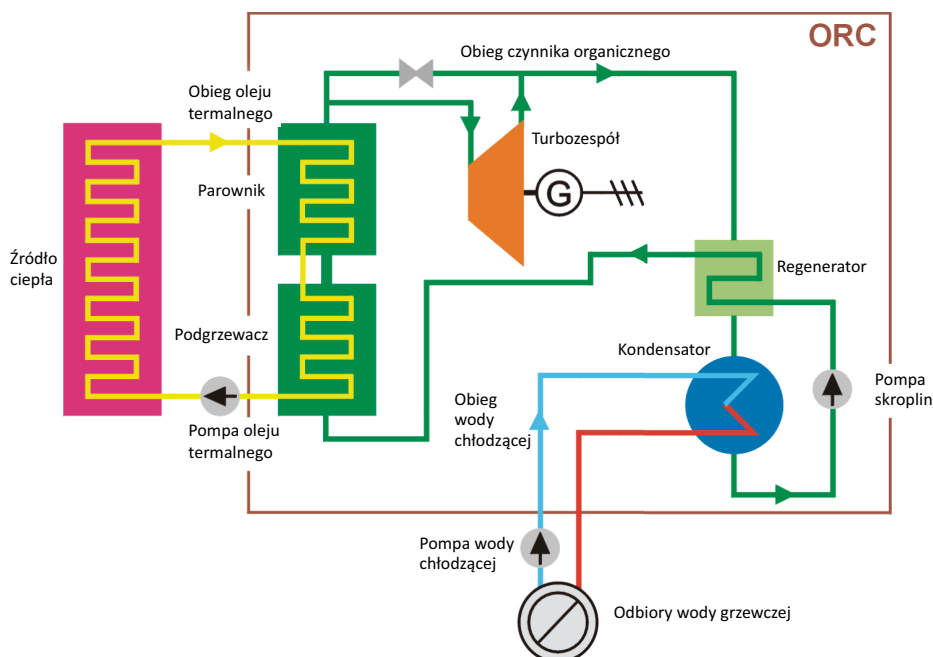
\*\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

wprowadzić nowe, innowacyjne technologie, które z pewnością można by określić najczystszy i doprowadzającymi do zerowej jakiegokolwiek emisji.

## 2. Wytwarzanie energii elektrycznej w układach ORC

W ostatnich latach odnotowano dość znaczący rozwój produkcji siłowni elektrycznych bazujących na klasycznym obiegu Clasiusa-Rankine'a z wykorzystaniem organicznego czynnika roboczego. Generalnie idea budowy tychże zespołów polega na odpowiednim dobraniu wspomnianej cieczy organicznej zastępującej wodę i parę wodną, turbiny o optymalnym ukształtowaniu oraz ciśnien roboczych i powierzchni wymian ciepłych. Napędem rozwoju tychże urządzeń było niewątpliwie wprowadzanie na rynek kotłów na biomase, lobby na rzecz energii odnawialnych i wymuszenie produkcji „energii zielonej”. Kotły na biomase z wymiennikiem oleju termalnego w łatwy sposób współpracują z urządzeniami kogeneracyjnymi ORC, produkując nie tylko energię elektryczną, ale także ciepło. Generalnie temperatura czynnika pośredniego na wejściu takiego urządzenia musi być większa od 250°C, tak aby urządzenie mogło pracować z największą sprawnością.

Na rycinie 1 przedstawiono intuicyjny schemat zasady działania układu ORC.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Schemat działania układu ORC

Zgodnie z ryciną 1 obieg oleju termalnego stanowi układ transportu ciepła ze źródła do wymiennika głównego (podgrzewacz i parownik), w którym czynnik termodynamiczny pochodzenia organicznego jest podgrzewany i odparowywany. Otrzymana para doprowadzana jest na wlot do turbiny wolnobieżnej, a przepływając przez kanały międzyłopatkowe wirnika ulega rozprężeniu, napędza wał turbiny i sprzężony z nią bezpośrednio generator energii elektrycznej. Po wykonaniu pracy czynnik termodynamiczny oddaje ciepło kondensacji wodzie chłodzącej i pompą kierowany jest do ponownego odparowania. Ciepło odebrane przez cyrkulującą wodę chłodzącą z układu ORC stanowi potencjał energetyczny, wykorzystywany głównie w celach ciepłowniczych. Istnieją również jednostki monoblokowe, gdzie układ chłodzenia działa na niższych temperaturach i kierowany jest na chłodnie wentylatorowe. W układach ORC stosuje się wolnoobrotowe turbiny połączone bezpośrednio (bez żadnych przekładni) z wałem 3-fazowego generatora energii elektrycznej, co prowadzi do uproszczenia układu mechanicznego turbozespołu i zwiększenia jego niezawodności ruchowej.

Jedną z ważniejszych zalet jednostek ORC w zakresie eksploatacyjnym jest ich mała wrażliwość na zmiany obciążenia (wysoka sprawność w całym zakresie modulacji mocy wejściowej) oraz szeroki zakres stabilnej pracy (minimum technologiczne do 10% obciążenia nominalnego). Przemysłowe układy ORC wyposażone są w automatyczny system rozruchu, synchronizacji z siecią oraz odstawiania turbozespołu, co pozwala na ich elastyczną pracę i dużą dyspozycyjność. Wysoki stopień zautomatyzowania wpływa także na obniżenie kosztów eksploatacyjnych (ograniczenie do minimum czynnika ludzkiego). Nominalna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w reaktorze ORC osiąga wartość rzędu 18%, a efektywność produkcji ciepła wynosi ok. 79–80%.

Urządzenia te stały się obecnie dość znanymi sposobami zaspokojenia potrzeb tzw. energetyki rozproszonej w całej Europie, niestety w Polsce ze względu na wysokie koszty tychże urządzeń dotychczas pracuje tylko kilka zespołów. W miarę jednak nowych możliwości zaczęto testować i opracowywać nowe jednostki, które mogą być zasilane medium o niższych temperaturach. Napędem tego kierunku jest rozwój geotermii, energii słonecznej oraz szeroko pojętego odzysku ciepła w procesach przemysłowych. Ku naszemu zadowoleniu dziś na rynku pojawiło się już kilka katalogowych zespołów ORC produkujących energię elektryczną o możliwościach zasilania temperaturami poniżej 15°C. W tabeli 1 przedstawiamy zestawienie parametrów technicznych kilku modeli.

T a b e l a 1

*Parametry techniczne siłowni ORC na podstawie danych producentów Pratt&Whitney oraz Turboden srl*

Parametry	Seria katalogowa						Projekt LOW-BIN
	1	2	3	4	5	6	
Obieg zasilający							
Temperatura wejściowa [°C]	138	138	116	116	93	93	80
Temperatura wyjściowa [°C]	77	85	78	90	78	78	65
Przepływ [m <sup>3</sup> /h]	40	50	76	112	238	238	216
Moc <sub>i</sub> [kW]	2 818	3 116	3 352	3 385	4 158	4 158	3 780
Obieg chłodzący							
Temperatura wejściowa [°C]	16	27	16	27	16	27	34
Temperatura wyjściowa [°C]	26	37	26	37	26	37	39
Przepływ [m <sup>3</sup> /h]	202	227	248	252	317	324	590
Moc <sub>i</sub> [kW]	2 352	2 646	2 898	2 940	3 696	3 780	3 444
Produkcja energii elektrycznej							
Potrzeby własne [kVA]	20	20	15	15	15	14	bd
Energia netto [kW]	252	252	257	257	257	186	217

W tabeli 1 widzimy, że temperatury zasilające układy osiągnęły nawet wartość poniżej 100°C, niestety zgodnie z równaniem strumienia energii wraz z obniżeniem różnicy temperatur zwiększa nam się przepływ masowy czynnika. W przypadku wykorzystania instalacji geotermalnych – generalnie osiągnięcie dużych przepływów nie jest problematyczne, a wręcz wskazane. Niestety, w odniesieniu do wykorzystania w kierunku ciepła odpadowego – trudne, a w przypadku niskotemperaturowego ciepła z powierzchni gorących, na obecnym etapie badań, wydaje się wysoce skomplikowane. Z pewnością układy te w chwili obecnej z powodzeniem mogłyby zostać zaadaptowane w procesie wykorzystania entalpii gazów odlotowych czy różnego typu obiegów chłodzących.

Ciekawe oraz rokujące nowe możliwości okazały się wyniki instalacji pilotażowej, realizowanej w ramach projektu Unii Europejskiej pod nazwą „LOW-BIN”, zlokalizowanego w Simbach (Austria), gdzie w skład konsorcjum pod przewodnictwem greckiej Agencji Poszanowania Energii wchodziły uczelnie i jednostki badawcze z Włoch, Niemiec, Austrii, Portugalii, Francji, Islandii i Rumunii. Wykonaniem instalacji zajął się włoski producent układów ORC firma Turboden. Projekt zakładał ocenę możliwości i w dalszym etapie badania na prototypie przy wykorzystaniu niskotemperaturowej wody geotermalnej. Opublikowane wyniki po zakończeniu projektu dają z pewnością nowe perspektywy rozwoju tychże urządzeń przy wykorzystaniu jeszcze niższych temperatur czynników zasilających. Niestety koszt wytworzenia wspomnianego prototypu w porównaniu z jednostkami standardowymi był większy o ok. 20%, przy 30% obniżeniu mocy energii elektrycznej.

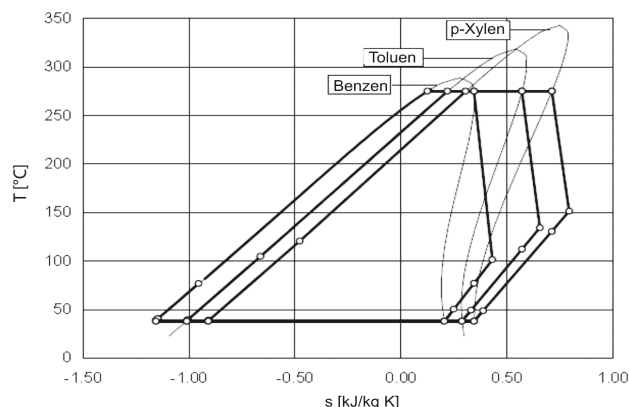
### 3. Kierunki optymalizacji układów ORC

Jedną z możliwości zmiany parametrów pracy układów ORC jest modyfikacja użytych czynników roboczych, zarówno pod względem strukturalnym, jak i ciśnień pracy, a co za tym idzie temperatur wrzenia. To, że zastąpienie wody i pary wodnej czynnikiem organicznym daje wymierne korzyści nie ulega wątpliwości. Przede wszystkim pozwala na mniejszą energochłonność procesu Clasiusa Rankine'a, czasem nawet pięciokrotnie. Generalnie możliwości wykorzystania różnego rodzaju cieczy organicznych są setki – niestety duże ograniczenia ich użyteczności generuje koszt ich pozyskania czy wytworzenia oraz względy bezpieczeństwa. Pomimo to paleta tych związków jest na tyle szeroka, że stwarza dalsze realne możliwości optymalizacyjne.

Jednym z zasadniczych parametrów jest temperatura wrzenia i parowania cieczy. Dążąc do zmiany fazy cyklu w układach bazujących na wysokich temperaturach roboczych wskazane byłyby także wysokie temperatury krytyczne. Niestety oznacza to niskie ciśnienie kondensacji, które stwarzał będzie problemy w projekcie turbiny i całej instalacji. Natomiast wysokie ciśnienie skraplania wymusza niskie temperatury krytyczne, co znow powodować będzie trudną konfigurację termodynamiczną. Sposobem na zmiany parametrowe może być ingerencja w budowę molekularną związku. Generalnie, powinno się dążyć do uzyskania płynów o podobnych krzywych nasycenia jak w przypadku wody. Niestety większość substancji organicznych ma budowę cząsteczkową złożoną, co mocno ogranicza ich użycie bądź komplikuje regenerację. Nie bez znaczenia pozostaje tutaj także masa cząsteczkowa substancji, w szczególności pod kątem projektu turbiny i jej ułopatkowania.

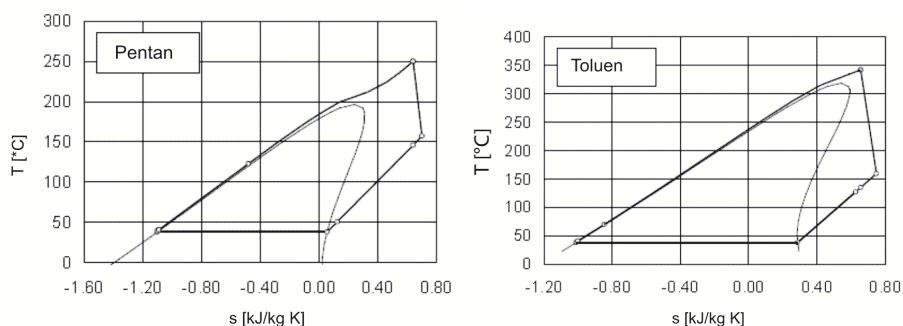
Duże znaczenie przy wyborze czynnika roboczego ma także jego klasa i właściwości palne czy toksyczne. Powszechnie wśród czynników, które z powodzeniem mogą pracować w układach ORC i generalnie spełniają wszystkie powyższe warunki stosowalności są: butan, pentan, p-xylen i toluen. Ponadto węglowodory fluorowane, które wykazują wyjątkową stabilność i obojętność, posiadają skrajnie złożoną budowę molekularną. Ciekawą grupą są również siloksany, które powinny stać się interesujące pod względem własności „mix fizycznych” i termicznych (niska toksyczność i palność, wysoka masa cząsteczkowa, możliwość długotrwałego stosowania jako nośnika ciepła o wysokiej temperaturze). Niestety bardzo często dostępne są one jako mieszaniny, a nie jako czyste ciecze i ma to wpływ na stabilność termodynamiczną (szczególnie nieizotermiczne parowanie).

Na rycinie 2 przedstawiono wykres fazowy T-s dla najczęściej wykorzystywanych węglowodorów aromatycznych jako czynnika roboczego siłowni ORC.



Ryc. 2. Wykres fazowy T-s czynników roboczych układów ORC [3]

Zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych i dedykowanych programów pozwala nam dzisiaj na symulację i optymalizację użycia danego czynnika pod względem kompatybilności termodynamicznej, a także określić nową charakterystykę fazową. Przykładowe zoptymalizowane wykresy przedstawia rycina 3.



Ryc. 3. Zoptymalizowany wykres fazowy T-s wybranych czynników roboczych układów ORC [3]

Oczywiście odpowiedni dobór i optymalizacja charakterystyki pracy czynników roboczych to nie tylko jedyne możliwości poprawienia parametrów układów ORC.

Kolejnym aspektem mającym wpływ na efekt końcowy ma także osiągnięcie minimalnej temperatury obiegu chłodzącego, optymalnego przepływu obiegu zasilającego czy odpowiedniego poziomu regeneracji cieczy roboczej. Ostatnią płaszczyzną możliwości maksymalizacji produkcji energii elektrycznej czy obniżenia parametrów wejściowych jest kombinacja w obrębie wielkości podstawowych urządzeń: parownika, regeneratora, kondensatora, czy wreszcie zoptymalizowania i dobrania najważniejszego elementu całego układu jakim jest turbina.

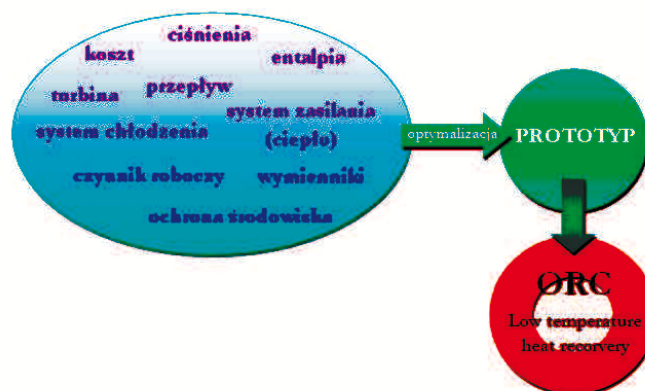
Jak duży wpływ na wielkość produkcji mają wszystkie opisane parametry obrazuje tabela 2, przedstawiająca wynik symulacji i optymalizacji układu projektu LOW-BIN w funkcji zmiennych temperatur obiegu zasilającego, ciśnienia czynnika roboczego, przepływu mediów czy powierzchni wymienników ciepła.

T a b e l a 2

Wyniki optymalizacji układu LOW-BIN [2]

Zmienna/parametr	T = 80°C	T = 100°C	T = 120°C	T = 140°C
P [bar]	16,24	26,51	29,98	29,98
$m_{\text{geotermalny}}$ [kg/s]	60	60	60	60
$m_{\text{R134a}}$ [kg/s]	18,5	17,5	16	16
Moc pompy czynnika R134a [kW]	22	47	53	53
$m_{\text{obiegu chłodzącego}}$ [kg/s]	167	161	159	161
Powierzchnia kondensatora [m <sup>2</sup> ]	1 647	1 629	1 831	1 785
Powierzchnia wężownicy [m <sup>2</sup> ]	445	397	154	83
Całkowita powierzchnia wymienników [m <sup>2</sup> ]	2 092	2 026	1 986	1 867
Sprawność netto przemiany	4,6	7,3	8,7	8,8
Otrzymana moc elektryczna netto [kW]	172	277	332	336

Jak widzimy, możliwości optymalizacyjnych, a co za tym idzie możliwości osiągnięcia jeszcze wydajniejszej siłowni ORC, jest bardzo wiele. Optymistyczne wyniki w przeprowadzonych badaniach i pilotażach geotermalnych dają powody i zachęcają do podjęcia przytoczonej tematyki w odniesieniu do jeszcze bardziej wymagającego zagadnienia, jakim jest odzysk i zagospodarowanie niskotemperaturowej energii odpadowej. Rycina 4 ilustruje schematycznie złożoność problemu projektu oraz wpływ czynników na efekt końcowy układu.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Ideowy schemat etapów projektu nowego układu ORC

## 4. Podsumowanie

Obecny wzrost zużycia energii elektrycznej nie tylko w świecie, ale i w naszym kraju spowodował, że o nadprodukcji energii z początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia możemy dawno zapomnieć. Z roku na rok obserwujemy spadek mocy rezerwowej, zaniedbania techniczne i anomalie pogodowe doprowadzające do coraz częstszego „blackout’u”. Niestety, nawet prawne możliwości zakupu energii spoza granic Polski niewiele dadzą, gdyż ilość odpowiednich połączeń pomiędzy naszymi sieciami energetycznymi jest dalece niewystarczająca. Rodzi się więc pytanie, czy nie sięgnąć w większym stopniu po energetykę rozproszoną?

Z pewnością jedna instalacja odzysku ciepła i konwersji go na energię elektryczną nie załata wielkiej dziury energetycznej, ale kilkadziesiąt na pewno poprawi obecną sytuację. Wbrew pozorom, zasoby energii odpadowej swobodnie oddawanej do atmosfery są ogromne. Przemysł szklarski, ceramiczny w jego makrorozumieniu, cementowy, wapienniczy, metalurgiczny czy chemiczny to tylko niektóre miejsca, gdzie powstaje niskotemperaturowa energia odpadowa o statusie nieużyteczności technologicznej. Przykładowo na Alasce przy wykorzystaniu wody geotermalnej i seryjnych układów ORC o mocy ok. 200 kW każdy, połączonych w jeden układ, udało się uzyskać instalację produkującą ponad 50 MW<sub>e</sub>.

Niestety, aby mogło dojść do realizacji podobnych projektów w naszym kraju niezbędna jest ścisła faza badawcza pomiędzy wieloma ośrodkami naukowymi i sektorem przemysłowym, jak również bardziej rozwinięte narzędzia prawne i przede wszystkim finansowe.

## Literatura

- [1] Karytsas C., Mendrinos D., *Efficient low temperature geothermal binary power*, Centre for Renewable Energy Sources & Saving, b.m. 2009.
- [2] Kontoleonos E., *Computer modelling and optimization of Rankine cycles for low temperature power generation*, Centre for Renewable Energy Sources & Saving, [w:] Low-Bin Final Workshop : Braunau 28 August, [www.lowbin.eu/documentation](http://www.lowbin.eu/documentation) (29.01.2010).
- [3] Angelino G., Colonna di Paliano P., *Organic rankine cycles (ORCs) for energy recovery from molten carbonate fuel cells*, [w:] *35th Intersociety Energy Conversion Engineering July 2000*, Las Vegas 2000.
- [4] Frick S., Kranz S., Saadat A., Huenges E., *Design Approach for Geothermal Binary Power Plants*, Helmholtz-Zentrum, Potsdam 2009.
- [5] Colombo D., *The Low-Bin ORC Turboden Prototype*, Simbach 2009, [www.lowbin.eu/documentation](http://www.lowbin.eu/documentation) (29.01.2010).
- [6] Materiały firmy Turboden Brescia, Italy., [www.turboden.eu](http://www.turboden.eu) (19.10.2010).
- [7] Materiały firmy Pratt&Whitney, USA, [www.pw.utc.com](http://www.pw.utc.com) (19.10.2010).



*PATRYK WEISSER*  
*PAWEŁ SKOTNICKI*

#### PERSPEKTIVE OF APPLICATION THE ORC SYSTEMS AT LOW TEMPERATURE WASTE ENERGY

Recently in Poland much more popular has become the electricity and heat technology called systems ORC (Organic Rankine Cycle). Idea and the main advantage of this system is the ability to use the media supply system with low temperatures. Additionally, the universality of this system allows to use not only for dedicated applications in systems boilers for biomass and geothermal, but also to the manifold system, waste heat recovery from industrial processes and energy, especially low temperature heat or solar energy. At this moment the market offer a lot of ranges ORC units models. However going to the direction of low temperature waste energy, we should think about the applicability of these systems as well as optimization and design capabilities of this units.