

Sebastian LEPSZY¹
Tadeusz CHMIELNIAK²

UKŁADY GAZOWO-PAROWE Z CO₂ JAKO CZYNNIKIEM ROBOCZYM

W procesie rozwoju technologii energetycznych istotne miejsce zajmują technologie wykorzystania ciepła odpadowego i technologie wykorzystania ciepła niskotemperaturowego. Jednym z najpopularniejszych obiegów wykorzystywanych w tym celu jest obieg Rankine'a. Wykorzystanie dwutlenku węgla jako czynnika roboczego zarówno w obiegach o ciśnieniu nadkrytycznym, jak i obiegach transkrytycznych cechuje się wieloma zaletami w porównaniu z tradycyjnymi obiegami wykorzystującymi parę wodną. Najistotniejsze z nich są związane z rozmiarami maszyn i urządzeń. Dwutlenek węgla jest również czynnikiem dostępnym, o małym potencjale wpływu na warstwę ozonową w porównaniu z innymi czynnikami organicznymi. W pracy przedstawiono analizę układu gazowo-parowego z CO₂ jako czynnikiem roboczym. W szczególności określono podstawowe parametry energetyczne oraz straty egzergii w wymiennikach ciepła.

Słowa kluczowe: obiegi nadkrytyczne, analiza egzergiczna, obieg z regeneracją

1. Wstęp

W procesie rozwoju technologii energetycznych obserwuje się obecnie również rozwój technologii związanych z wykorzystaniem ciepła odpadowego oraz ciepła ze źródeł odnawialnych do produkcji energii elektrycznej. Jedną z najczęściej wykorzystywanych struktur silnika cieplnego jest obieg Rankine'a. Obieg tego typu jest szczególnie atrakcyjny pod względem wykorzystania ciepła odpadowego i niskotemperaturowego z uwagi na niską temperaturę dolnego źródła ciepła [6]. Czynniki w obiegach termodynamicznych, a w szczególności w obiegu Rankine'a, powinny się wyróżniać małą agresywnością w stosunku do materiałów, dostępnością i niską ceną, nietoksycznością, niepalnością, stabilnością chemiczną. Dodatkowo powinny się również charakteryzować niską temperaturą wrzenia w warunkach normalnych i małą lepkością.

Czynniki mogą mieć różne właściwości związane z procesem rozprężania. W tym kontekście można wyróżnić czynniki „mokre” (jak para wodna), czynni-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Sebastian Lepszy, Politechnika Śląska, ul. S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 2372337, e-mail: sebastian.lepszy@polsl.pl.

² Tadeusz Chmielniak, Politechnika Śląska, e-mail: tadeusz.chmielniak@polsl.pl.

ki „suche” oraz czynniki izentropowe. Wykorzystanie czynników „mokrych” wiąże się najczęściej z zastosowaniem procesu przegrzania pary w celu podwyższenia stopnia suchości czynnika po procesie rozprężania [7]. W energetyce oprócz pary wodnej stosuje się także wiele innych czynników roboczych. Bardzo często znajdują zastosowanie czynniki organiczne, takie jak: amoniak, pentan, izobutan. Duże masy cząsteczkowe czynników umożliwiają budowę układów o stosunkowo niewielkich wymiarach. Z wielu czynników organicznych interesujące właściwości posiada dwutlenek węgla. Jedną z najistotniejszych zalet dwutlenku węgla stanowi fakt, że jest to czynnik naturalny, a zatem w ilościach pochodzących z obiegu energetycznego nie ma wpływu na efekt cieplarniany. Innymi istotnymi cechami są stabilność chemiczna i niepalność. Interesującym zagadnieniem jest określenie efektywności ekonomicznej oraz energetycznej obiegów z CO₂, szczególnie z zakresu, w którym mogą konkurować z obiegiem parowo-wodnym, np. w układach, w których istotne znaczenie mają nakłady inwestycyjne oraz waga i rozmiary układu parowego [1, 5, 8]. Dziedziną techniki, która może się przyczynić do rozwoju obiegów z CO₂ jako czynnikiem roboczym jest rozwój sposobów wychwytu i składowania dwutlenku węgla (CCS). Prace badawcze skierowane na opracowanie efektywnych maszyn, takich jak pompy, sprężarki, turbiny do technologii CCS oraz badania materiałowe, mogą być również wykorzystane w obiegach z CO₂ [2, 3, 9]. Dwutlenek węgla może znaleźć zastosowanie zarówno w konwencjonalnych siłowniach, jak i niekonwencjonalnych układach siłowni jądrowych ze stopionym metalem, w układach magazynowania energii słonecznej w postaci stopionych soli i zeroemisyjnych technologii węglowych [4].

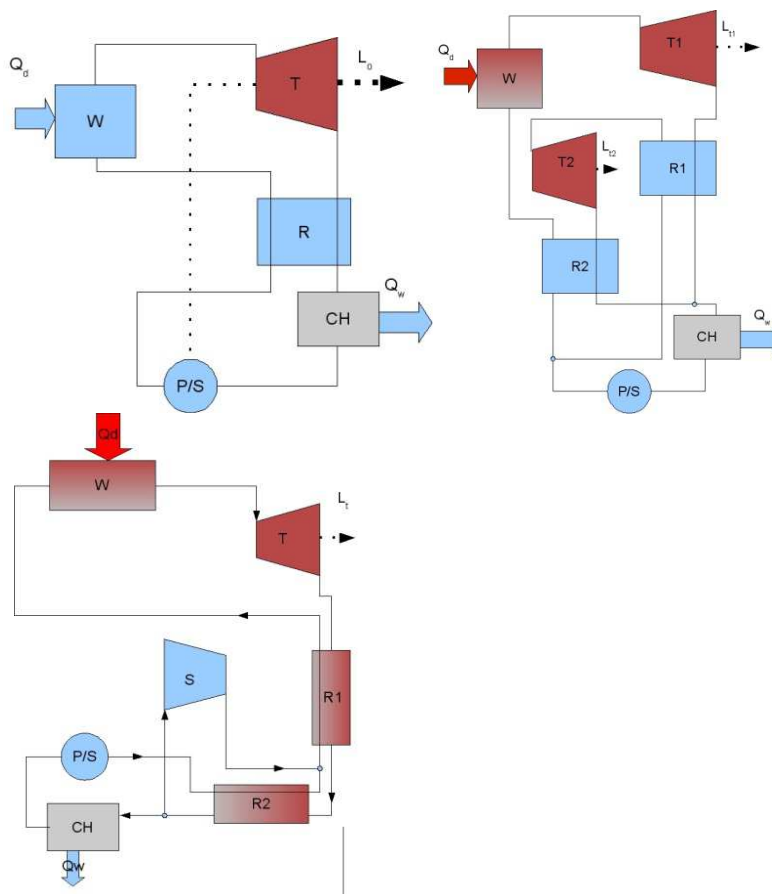
2. Obiegi z CO₂ jako czynnikiem roboczym

Zasadniczo układy wykorzystujące CO₂ jako czynnik roboczy można podzielić na układy, w których ciepło jest przekazywane do otoczenia z zastosowaniem procesu kondensacji i układy, które nie wykorzystują tego ciepła. Dla tego podziału odpowiednie są najprostsze porównawcze obiegi Rankine’a i Braytona. Zastosowanie procesu kondensacji w procesie oddawania ciepła do otoczenia może być w niektórych przypadkach utrudnione ze względu na niską temperaturę punktu krytycznego CO₂, wynoszącą 31,04°C. Jednocześnie wartość ciśnienia dla temperatury przemiany fazowej jest znacznie wyższa niż w przypadku pary wodnej, wymagana jest jednak mocniejsza konstrukcja skraplacza. Kolejna możliwość podziału obiegów dotyczy wartości poziomów ciśnienia stosowanych w układzie. Wyróżnia się wówczas:

- obiegi nadkrytyczne, w których zarówno doprowadzanie, jak i odprowadzanie ciepła do obiegu odbywa się w zakresie ciśnień większych niż ciśnienie krytyczne,

- obiegi transkrytyczne, w których doprowadzanie ciepła odbywa się w zakresie nadkrytycznych ciśnień czynnika, a odprowadzanie – w zakresie ciśnień podkrytycznych,
- obiegi podkrytyczne, w których wszystkie procesy w obiegu zachodzą w obszarze ciśnień podkrytycznych.

Najczęściej spotykane w literaturze schematy obiegów cieplnych przedstawiono na rys. 1. [4].



Rys. 1. Schemat ideowy obiegów z CO₂ jako czynnikiem roboczym (W – wymiennik ciepła; T, T1, T2 – turbiny; R, R1, R2 – rekuperatory; CH – chłodnica, skraplacz; P/S – pompa lub sprężarka)

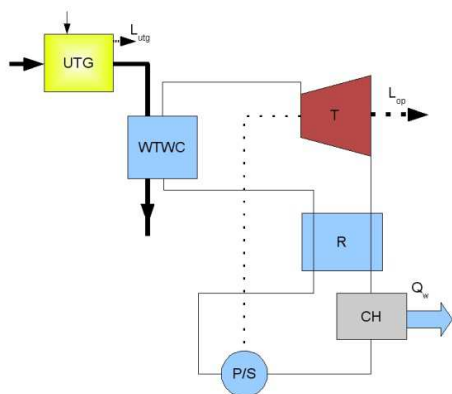
Fig. 1. Scheme diagram of CO₂ cycles (W – heat exchanger; T, T1, T2 – turbines; R, R1, R2 – recuperators; CH – cooler, condenser; P/S – pump or compressor)

Obiegi wykorzystujące CO₂ jako czynnik roboczy najczęściej są wyposażone w wymienniki regeneracyjne. Wiąże się to z charakterem linii nasycenia na

wykresie i - s powodującym, że po rozprężeniu czynnik jest w postaci pary przegrzanej. Zastosowanie wymiennika regeneracyjnego zwiększa sprawność obiegu, jednak ze względu na znaczne różnice ciepła właściwego dwutlenku węgla w różnych ciśnieniach, szczególnie przy niskich temperaturach, poszukuje się obiegów, które będą jeszcze bardziej efektywne.

3. Analiza układu z wymiennikiem regeneracyjnym

Jednym z najprostszych i najbardziej popularnych obiegów wykorzystujących CO_2 jako czynnik roboczy jest układ z jednym wymiennikiem regeneracyjnym. Schemat ideowy analizowanego układu gazowo-parowego ilustruje rys. 2. W stosunku do obiegu bez wymiennika regeneracyjnego układ taki cechuje się wyższą sprawnością, uzyskaną przez obniżenie temperatury wyprowadzania ciepła z obiegu i podwyższenie temperatury doprowadzania ciepła do obiegu. Wadą tego typu obiegów jest wysoka temperatura czynnika na wlocie do wymiennika WTWC, co ogranicza możliwość wykorzystania górnego źródła ciepła. Obiegi tego typu mogą być obiegami z kondensacją, jak i bez kondensacji. Wtedy odpowiednio do zwiększenia ciśnienia czynnika w obiegu wykorzystuje się pompę lub sprężarkę.



Rys. 2. Schemat układu gazowo-parowego

Fig. 2. Scheme of gassteam cycle

Do określenia podstawowych parametrów układu parowego przyjęto wiele założeń. Najważniejsze z nich przedstawiono w tab. 1. W przypadku wykorzystania obiegu z regeneracją istnieje możliwość doboru wielkości regeneratora, co ma wpływ na większość parametrów układu. Na rysunku 3. przedstawiono wpływ ilości ciepła wymianianego w wymienniku Q_r na sprawność obiegu η_{oUP} i energetyczną η_{eUP} układu parowego. W celu zilustrowania ilości ciepła przekazanego w regeneratorsie odniesiono je do wartości ciepła spalin Q_{sp} . Sprawność energetyczną układu parowego zdefiniowano w następujący sposób:

$$\eta_{eUP} = \frac{N_{mUP}}{Q_{sp}} \quad (1)$$

gdzie: N_{mUP} – moc mechaniczna układu parowego, Q_{sp} – strumień ciepła schłodzenia spalin do temperatury odniesienia (w celu uproszczenia analiz w obliczeniach założono, że ciepło Q_{sp} odpowiada schłodzeniu spalin do temperatury 15°C, przy czym para wodna zawarta w spalinach nie ulega wykropleniu).

Sprawność obiegu zdefiniowano wzorem:

$$\eta_{oTP} = \frac{N_{mTP}}{Q_{WTWC}} \quad (2)$$

gdzie Q_{WTWC} – strumień ciepła przekazany czynnikowi obiegowemu w wymienniku WTWC.

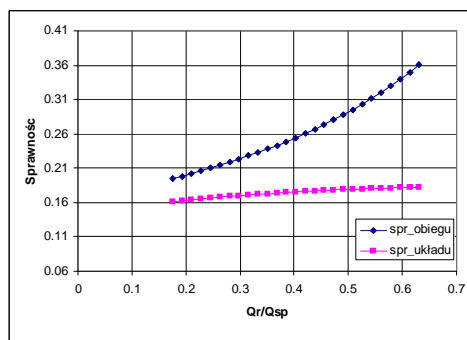
Tabela 1. Założenia do analizy obiegu parowego

Table 1. Assumptions for analysis of steam cycle

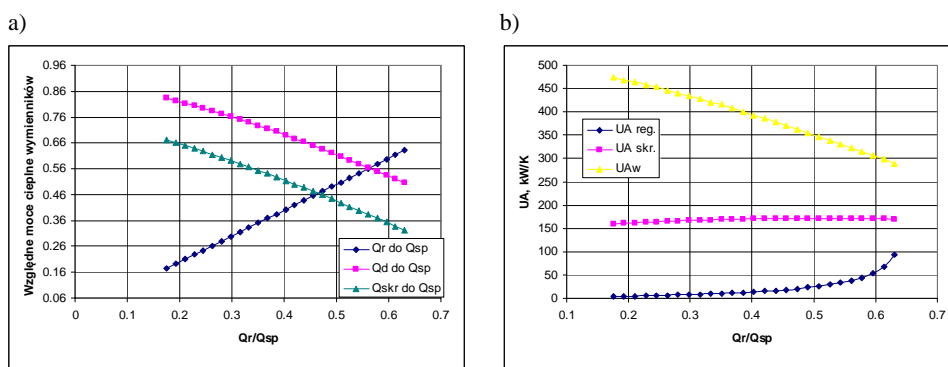
Spaliny z turbiny gazowej	Temperatura: 532°C, ciśnienie: 1 bar, skład (udziały objętościowe): 3,69% CO ₂ , 8,11% H ₂ O, 75,41% N ₂ , 12,79% O ₂
Wymiennik ciepła WTWC	Temperatura pary wylotowej: 522°C
Turbina T	Sprawność izentropowa: 0,8; ciśnienie wylotowe: 58 bar
Wymiennik regeneracyjny R	Moc cieplna wymiennika w zakresie 0,18-0,62 w stosunku do energii cieplnej spalin z turbiny gazowej Q_{sp}
Skraplacz CH	Temperatura kondensacji: 20°C, temperatura wody chłodzącej wlotowej: 15°C
Pompa P	Sprawność wewnętrzna: 0,8; ciśnienie czynnika wylotowego: 200 bar

Rys. 3. Zależność sprawności obiegu i sprawności układu w funkcji stosunku mocy cieplnej regeneratora do strumienia ciepła zawartego w spalinach

Fig. 3. The relation between cycle and system efficiency as a function of relation of recuperator thermal power to the heat flow contained in the exhaust gas



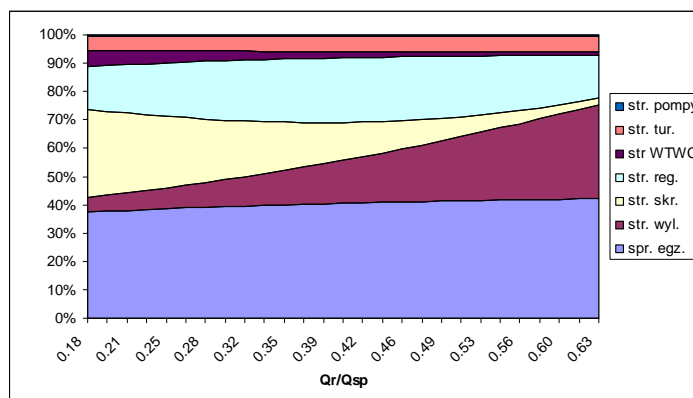
Maksymalna wartość temperatury wynika z procesu wymiany ciepła i różnicy w strumieniach pojemności cieplnych w wymienniku regeneracyjnym. Ze względu na różnice pomiędzy strumieniami pojemności cieplnej czynnika, minimalna wartość temperatury jest osiągnięta pomiędzy wylotem czynnika schładzanego i wlotem czynnika ogrzewanego. Zwiększenie stopnia regeneracji skutkuje bardzo silnym wzrostem sprawności obiegu, wzrost sprawności układu jest jednak niewielki. Pomimo wysokiej sprawności obiegu parowego wykorzystanie go w układzie gazowo-parowym, w którym turbina gazowa ma sprawność 36%, spowoduje, że układ gazowo-parowy będzie miał sprawność nieprzekraczającą 47,5%. Zależność względnej mocy wymienników ciepła dla wymiennika regeneracyjnego o różnej wielkości zobrazowano na rys. 4a. Do oceny rozmiarów wymienników ciepła bardziej miarodajny jest rys. 4b, na którym przedstawiono wartości iloczynu współczynnika przenikania ciepła i pola powierzchni wymiany ciepła.



Rys. 4. Zależność względnych mocy cieplnych (a) oraz zależności iloczynu współczynnika przenikania ciepła i pola powierzchni wymiany ciepła wymienników (b) w funkcji względnej mocy cieplnej wymiennika R

Fig. 4. The relation between relative thermal power (a) and a product of heat transfer coefficient and heat transfer area of heat exchangers (b) as a function of relative recuperator thermal power of recuperator R

Wybór układów o wysokim stopniu regeneracji jest uzasadniony przede wszystkim wysoką sprawnością układu, mniejszym wysokotemperaturowym wymiennikiem ciepła. Negatywnym aspektem jest jednak wielkość regeneratora. Należy zauważyć, że regenerator może być konstrukcyjnie prostszy, ze względu na duży stopień czystości czynników w porównaniu z wysokotemperaturowym wymiennikiem ciepła. Rysunek 5. ilustruje bilans egzergii (wartości odniesione do egzergii spalin z turbiny gazowej) dla elementów układu parowego w zależności od ilości energii cieplnej wymienianej w wycinku regeneracyjnym.



Rys. 5. Bilans egzergii dla układu parowego

Fig. 5. Exergy balance for steam cycle

4. Podsumowanie

Obiegi parowe z CO₂ jako czynnikiem roboczym mogą być interesującą alternatywą w stosunku do obiegów parowych wodnych, jednak ich wykorzystanie wymaga dogłębnych analiz techniczno-ekonomicznych. Analiza pracy układu z jednym wymiennikiem regeneracyjnym pozwala stwierdzić, że pomimo straty wylotowej, z technicznego punktu widzenia bardziej interesujące są układy o dużym stopniu regeneracji. Układ taki charakteryzuje się również małym wymiennikiem wysokotemperaturowym, co może mieć wpływ na efektywność ekonomiczną.

Podziękowanie

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

Literatura

- [1] Chen H., Goswami D.Y., Rahman M.R., Stefanakos E.K.: Energetic and exergetic analysis of CO₂- and R32-based transcritical Rankine cycles for low grade heat conversion, *Applied Energy*, 88 (2011), 2802-2808.
- [2] Chmielniak T.J., Bełch K.: Wychwytem, transport i składowanie CO₂ – przegląd technologii, *Archiwum Energetyki*, 38 (2008), 61-81.
- [3] Walnum H.T., Nekså P., Nord L.O., Andresen T.: Modelling and simulation of CO₂ (carbon dioxide) bottoming cycles for offshore oil and gas installations at design and off-design conditions, *Energy*, 59 (2013), 513-520.

- [4] Johnson G.A. et al.: Supercritical CO₂ cycle development at Pratt & Whitney Rocketdyne, Proc. ASME TurboExpo GT2012, Copenhagen, GT2012-70105.
- [5] Kimball K.J., Clementoni E.M.: Supercritical carbon dioxide Brayton power cycle development overview, Proc. ASME TurboExpo GT2012, Copenhagen, GT2012-68204.
- [6] Lepszy S.: Energy analysis of biogas fueled micro gas turbine and reciprocating engine combined with organic Rankine cycle, 11th Int. Conf. Heat engines and environmental protection, Balatonfüred, Węry 2013.
- [7] Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J.: Working fluids for low-temperature organic rankine cycles, Energy, 32 (2007), 1210-1221.
- [8] Vélez F., Segovia J., Chejne F., Antolín G, Quijano A., Martín M.C.: Low temperature heat source for power generation: Exhaustive analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle, Energy, 36 (2011), 5497-5507.
- [9] Witkowski A., Majkut M.: The impact of CO₂ compression systems on the compressor power required for a pulverized coal-fired power plant in post-combustion carbon dioxide sequestration, Arch. Mech. Eng., 59 (2012), 343-360.

GAS-STEAM COMBINED CYCLES WITH CO₂ AS WORKING MEDIUM

Summary

In the process of the development of energy systems, waste heat recovery and low temperature technologies occupy an important place. One of the most common system used for this purpose is the Rankine cycle. The use of carbon dioxide as the working medium in both the super- and sub critical pressure cycles has several advantages compared to traditional steam cycles. The most important advantages are associated with dimensions of machines and equipment. Carbon dioxide is also a common medium, with a low potential impact on the ozone layer as compared to other organic mediums. The paper presents an analysis of different configurations of the gas-steam cycles with CO₂ as the working fluid. In particular, the basic parameters of the energy analysis were determined and exergy losses are specified.

Keywords: supercritical cycles, exergy analysis, regeneration cycle

DOI: 10.7862/rm.2015.13

Otrzymano/received: 14.09.2014 r.

Zaakceptowano/accepted: 14.02.2015 r.