

유기랭킨사이클과 암모니아-물 랭킨사이클의 열역학적 성능의 비교 해석

김경훈¹ · 김만회^{2†}

¹금오공과대학교 기계공학과, ²경북대학교 기계공학부

Comparative Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle and Ammonia-Water Rankine Cycle

KYOUNG HOON KIM¹, MAN-HOE KIM^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 39177, Korea

²School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract >> In this paper a comparative thermodynamics analysis is carried out for organic Rankine cycle (ORC) and ammonia-water Rankine cycle (AWRC) utilizing low-grade heat sources. Effects of the working fluid, ammonia concentration, and turbine inlet pressure are systematically investigated on the system performance such as mass flow rate, pressure ratio, turbine-exit volume flow, and net power production as well as the thermal efficiency. Results show that ORC with a proper working fluid shows higher thermal efficiency than AWRC, however, AWRC shows lower mass flow rate of working fluid and lower pressure ratio of expander than ORC.

Key words : Organic Rankine cycle(유기랭킨사이클), Ammonia-water Rankine cycle(암모니아-물 랭킨사이클), Low-grade source(저등급 열원), Working fluid(작동유체), Thermal efficiency(열효율)

Nomenclature

| | | | |
|-------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| c_p | : specific heat, kJ/kg°C | Q | : heat transfer rate, kW |
| H | : dimensionless heat transfer | T | : temperature, °C |
| h | : specific enthalpy, kJ/kg | v | : specific volume, m ³ /kg |
| M | : molar mass, kg/kmol | V_e | : volume flow rate per kW |
| m | : mass flow rate, kg/s | W_{net} | : net power production, kW |
| P | : pressure, kPa | w_{net} | : specific net work, kJ/kg |
| p_H | : reduced turbine inlet pressure | x_b | : ammonia mass fraction |
| | | ΔT_{pp} | : pinch temperature difference, °C |
| | | η | : isentropic efficiency |
| | | η_{th} | : thermal efficiency |
| | | ω | : acentric factor |

[†] Corresponding author : manhoe.kim@knu.ac.kr

Received: 2016.9.19 in revised form: 2016.10.14 Accepted: 2016.10.30

Copyright © 2016 KHNES

Subscripts

| | |
|------|-----------------|
| c | : condenser |
| cr | : critical |
| H | : turbine inlet |
| p | : pump |
| s | : source |
| sout | : source exit |
| t | : turbine |

1. 서 론

물을 작동유체로 하는 기존의 스팀 랭킨사이클은 열원의 온도가 낮아질수록 열효율이 낮아지다가 열원의 온도가 약 370°C 이하가 되면 경제성을 잃게 된다. 산업 폐열이나 지열 등 저온 열원을 효율적으로 변환하는 경쟁력 있는 동력 시스템으로서 유기랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)과 비공비 혼합물을 작동유체로 이용하는 동력 사이클이 인정받고 있으며 활발히 연구되고 있다¹⁾.

ORC는 기본적인 구성이 기존의 스팀 랭킨 사이클과 같지만 비등점이 물보다 낮은 유기물질을 작동유체로 사용하기 때문에 보다 낮은 열원 온도에서도 효과적으로 구동될 수 있다. ORC는 또한 다양한 저등급의 열원을 사용할 수 있고 구조가 간단하며 신뢰성도 높으나, 작동유체와 운전조건의 선정이 시스템의 성능과 열효율은 물론 환경에도 큰 영향을 미치기 때문에 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다²⁾.

작동유체로 비공비 혼합물(zeotropic mixture)을 사용하면 일정한 압력에서도 온도가 변화하며 상이 변한다. 이렇게 온도가 변화하면서 열전달 되는 과정은 열교환기 내에서 고온과 저온 흐름에서의 불균형을 줄여주기 때문에 특히 현열 형태의 저등급 열원을 이용한 동력 사이클에 효율적이다. 특히 암모니아와 물의 혼합물을 작동유체로 하는 열동력 시스템은 비등점을 물보다 낮출 수 있기 때문에 수증기를 발생시

킬 정도로 온도가 높지 않은 저온 열원도 효과적으로 활용할 수 있으며 터빈 입구 압력을 낮추고 작동 유체의 순환 유량도 줄일 수 있어 운전 경비를 절감할 수 있다. 게다가 혼합물은 순수 물과 분자량이 비슷하기 때문에 증기터빈을 그대로 사용할 수 있으며 산업체에서 쓰이는 다른 혼합물들에 비해 환경에 미치는 영향이 작은 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 최근 들어 다양한 분야로 응용범위를 넓혀가고 있다⁴⁻⁵⁾.

Zamfires와 Dincer⁶⁾은 보일러 없이 포화액을 팽창기에서 팽창시키는 삼각 암모니아-물 랭킨사이클에 대해 연구하였으며, Roy 등⁷⁾은 암모니아-물 랭킨 사이클(Ammonia-water Rankine cycle, AWRC)의 열역학적 성능 특성을 유한 열원(finite thermal reservoir)에 대해 해석하였다. Wagner 등⁸⁾은 스크롤 팽창기를 채용한 AWRC의 열역학적 성능 특성에 대해 연구하였으며 Kim 등⁹⁻¹⁰⁾은 기본 및 재생 AWRC 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석을 수행하였다. 또한 AWRC의 증발기, 재생기, 응축기 등 열교환기에서 고온과 저온 유체의 온도분포특성과 핀치 포인트에 대한 해석연구가 보고되었으며¹¹⁾, LNG의 냉열 에너지를 활용하는 AWRC 복합 사이클에 대한 해석 연구도 보고되었다¹²⁾.

본 연구에서는 현열 형태의 저온 열원의 동력 변환을 위한 ORC와 AWRC의 열역학적 성능 특성을 비교 해석한다. ORC에서는 작동 유체가 AWRC에서 암모니아 농도와 터빈 입구 압력이 각각 ORC와 AWRC의 열역학적 성능(질량유량, 시스템 출력, 열효율, 단위출력당 터빈출구 체적유량 및 압력비 등)에 미치는 영향을 체계적으로 비교 해석한다.

2. 시스템 해석

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 온도 T_s 의 현열 형태의 저온 열원 유체를 사용하고, 응축기, 펌프, 열교환기, 그리고 터빈으로 구성된 ORC 및 AWR

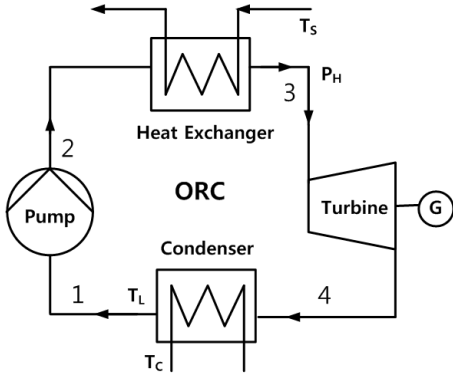


Fig. 1 Schematic diagram of ORC system

의 열역학적 성능 특성에 대해 비교 분석한다. 시스템에서 작동유체는 온도 T_c 의 냉각수에 의해 냉각되어 온도 T_L 의 포화액 상태로 응축기를 나온다(상태 1). 이때의 포화압력 P_L 은 응축기압으로서 시스템의 저압이 되며 펌프에서 작동유체는 터빈 입구압 P_H 까지 가압되어(상태 2), 열교환기로 들어가 열원 유체를 통해 터빈입구온도 T_H 까지 가열된다(상태 3). 열교환기를 나온 작동유체의 증기는 터빈에서 응축기 압력까지 팽창 된다(상태 4).

본 연구에서는 펌프, 터빈 및 교축밸브를 제외한 요소에서 압력손실은 무시하며, 펌프와 터빈의 등엔트로피 효율은 각각 η_p 와 η_t 로 일정하다고 가정한다. 또한 열교환기 및 응축기에서는 고온 및 저온 유체 간 열전달 이외의 열손실은 무시하며, 고온 유체와 저온 유체의 최소 온도차는 핀치온도차 ΔT_{pp} 로 운전된다고 가정한다.

열원 유체의 질량유량이 m_s 로 주어졌을 때 작동유체의 질량유량 m_w 는 열교환기에서의 에너지 평형으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_w = \frac{m_s c_{ps} (T_s - T_{sout})}{h_3 - h_2} \quad (1)$$

시스템의 유입열 Q_{in} , 순생산 출력 W_{net} , 시스템의 열효율 η_{th} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 1 Basic data for working fluids

| Substance | M (kg/kmol) | Tcr (°C) | Pcr (MPa) | ω |
|-----------|-------------|----------|-----------|----------|
| R134a | 102.031 | 106.85 | 3.690 | 0.239 |
| R600a | 58.123 | 134.99 | 3.648 | 0.177 |
| R245fa | 134.048 | 154.05 | 3.640 | 0.372 |
| R123 | 136.467 | 183.75 | 3.674 | 0.282 |

$$Q_{in} = m_w (h_3 - h_2) \quad (2)$$

$$W_{net} = m_w w_{net} = m_w [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] \quad (3)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (4)$$

본 연구에서 ORC의 작동유체는 임계온도가 낮은 순으로 R134a, R600a(이소부탄), R245fa 및 R123의 네가지 물질을 고려하며 이들의 열역학 상태량들은 Patel-Teja의 상태방정식을 이용하여 계산한다¹³⁻¹⁴. 작동유체에 대한 분자량 M , 임계온도 T_{cr} , 임계압력 P_{cr} , 이심인자 ω 등 기본적인 열역학적 성질들은 Table 1에 주어진다¹⁵. 또 암모니아-물 혼합물의 열역학 상태량들은 Xu 등¹⁶ 및 Kim 등⁹의 방법을 따른다. 터빈입구압력이 15bar일 때 기본적인 시스템 변수값들에 대해서 Fig. 2에서는 ORC의 네가지 작동

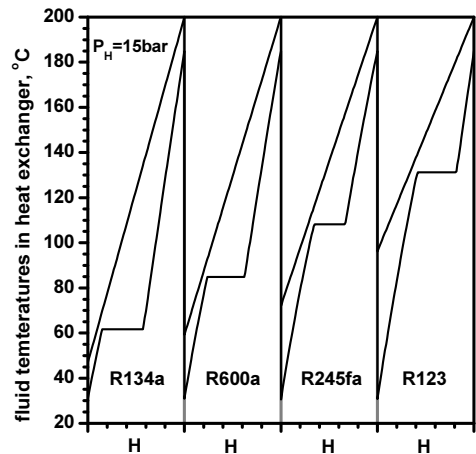


Fig. 2 Fluid temperatures in ORC heat exchanger

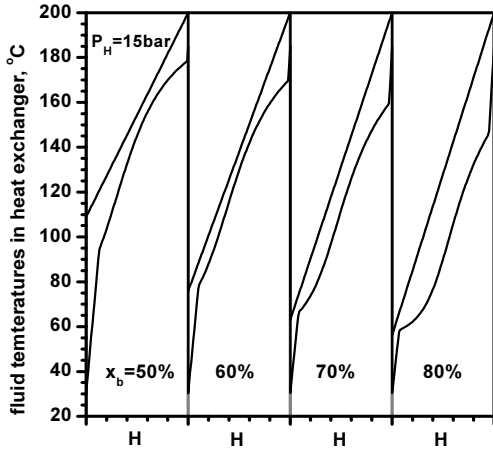


Fig. 3 Fluid temperatures in AWRC heat exchanger

유체에 대해 그리고 Fig. 3에서는 AWRC의 암모니아 농도가 50%, 60%, 70% 및 80%일 때 열교환기에서 열원 유체와 작동유체의 온도 변화를 보여주며 여기에서 H 는 열교환기 내의 무차원 열전달을 나타낸다. 그림에서 암모니아-물 혼합물의 상변화가 시작되는 기포점은 암모니아 농도가 높아질수록 낮아짐을 알 수 있다.

3. 결과 및 토의

시스템의 주요 변수 값들은 기본값으로서 $T_s = 200^\circ\text{C}$, $T_H = 185^\circ\text{C}$, $T_L = 30^\circ\text{C}$, $T_C = 15^\circ\text{C}$, $P_H = 15\text{ bar}$, $\Delta T_{pp} = 8^\circ\text{C}$, $\eta_p = 80\%$, $\eta_t = 80\%$ 를 사용하며, 열원 유체는 유량 1 kg/s의 물이다.

Fig. 4에서는 터빈입구압력에 따른 작동유체 단위 질량당 시스템의 순생산일의 변화를 보여준다. ORC에서 비순생산일은 터빈입구압력에 대해 최대값을 갖는데 터빈입구압력 설정 범위에 따라 최대값을 가질 수도 있고 증가하거나 감소할 수 있다. 비순생산일은 R600a의 경우에 가장 크고 R134a의 경우에 가장 작다. AWRC에서 비순생산일은 터빈입구압력이 증가하거나 암모니아 농도가 감소할수록 커지며 ORC의 경우보다 훨씬 큰데 이는 암모니아-물 혼합

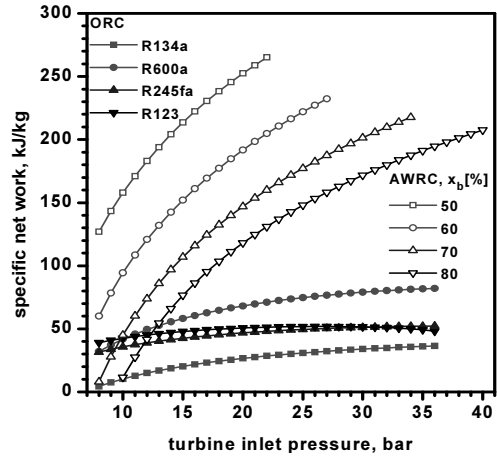


Fig. 4 Variations of specific net work

물의 증발잠열이 훨씬 크기 때문이다.

Fig. 5에서는 터빈입구압력에 따른 작동유체의 질량유량의 변화를 보여준다. 질량유량은 ORC에서 R134a의 경우에 가장 크고 R600a의 경우에 가장 작으며, AWRC에서는 터빈입구압력이 증가하거나 암모니아 농도가 감소할수록 작아진다. 같은 운전조건에서 AWRC의 질량유량이 ORC의 경우보다 훨씬 작는데 이는 AWRC의 경우에 운전경비가 훨씬 적게 들 수 있음을 의미한다.

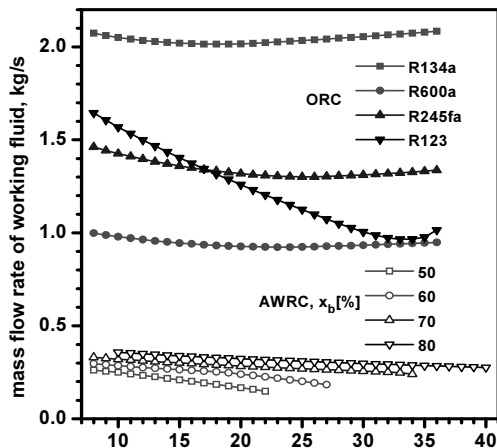


Fig. 5 Variations of mass flow rate of working fluid

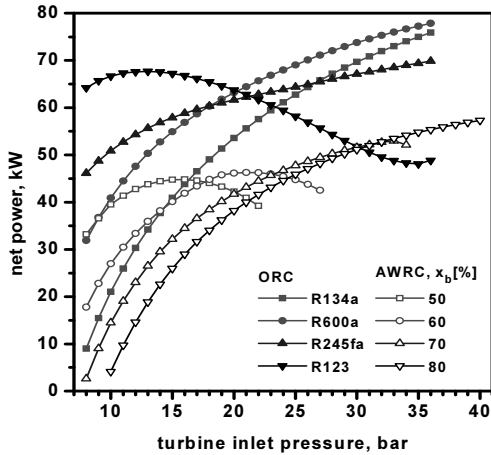


Fig. 6 Variations of net power production of system

시스템의 출력은 비순생산일과 질량유량의 곱으로 구할 수 있는데 Fig. 6에서는 터빈입구압력에 따른 시스템의 출력의 변화를 보여준다. ORC에서 시스템 출력은 터빈입구압력이 약 20bar 이하에서는 R123의 경우가 그리고 그 이상에서는 R600a의 경우가 가장 크다. AWRC에서 시스템 출력은 낮은 터빈입구압력에서는 암모니아 농도가 낮은 경우가 크고 높은 터빈입구압력에서는 암모니아 농도가 높은 경우가 크다. 시스템 출력은 AWRC의 경우가 ORC의 경우보다 작는데 이는 AWRC의 질량유량이 훨씬 작기 때문이다.

Fig. 7에서는 터빈입구압력에 따른 시스템의 유입열의 변화를 보여준다. 시스템의 유입열은 ORC나 AWRC의 경우 모두 터빈입구압력이 높아짐에 따라 감소한다. 동일한 터빈입구압력에서 ORC의 유입열은 R134a, R600a, R245fa 및 R123의 임계온도가 높아지는 순으로 작아지는데 이는 Fig. 2에서 보는 것처럼 포화온도가 높아져서 열원유체의 열교환기 출구온도가 높아지기 때문이다. AWRC의 유입열은 암모니아 농도가 낮아질수록 작아지는데 이는 Fig. 3에서 보는 것처럼 기포점이 높아져서 열원유체의 열교환기 출구온도가 높아지기 때문이다.

Fig. 8에서는 터빈입구압력에 따른 시스템의 열효

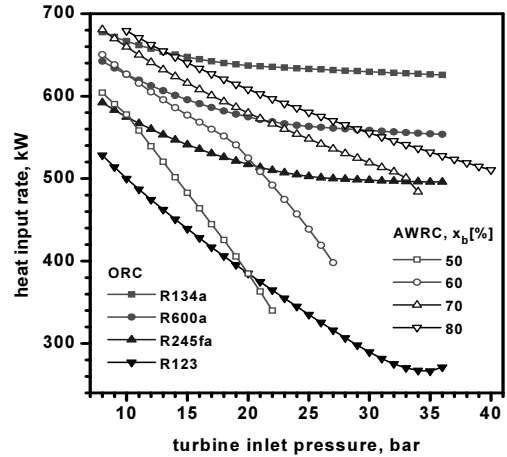


Fig. 7 Variations of heat input rate

율의 변화를 보여준다. 열효율은 ORC나 AWRC 모두 터빈입구압력의 상승에 따라 증가하며, ORC의 경우 R134a, R600a, R245fa 및 R123의 임계온도가 높아지는 순으로 높아지며 AWRC의 경우 암모니아 농도가 낮아질수록 높아진다. ORC의 경우 작동유체의 선택에 따라 AWRC의 경우보다 높은 열효율을 얻을 수 있다.

Fig. 9에서는 터빈입구압력에 따른 시스템의 압력비의 변화를 보여준다. 압력비는 터빈 출구압력에 대한 터빈입구압력의 비로 정의되며 터빈출구압력이

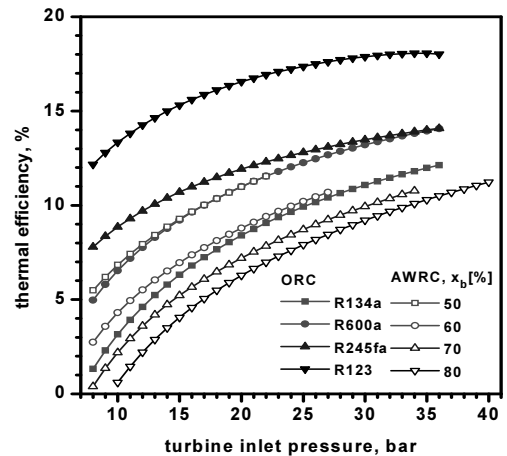


Fig. 8 Variations of thermal efficiency

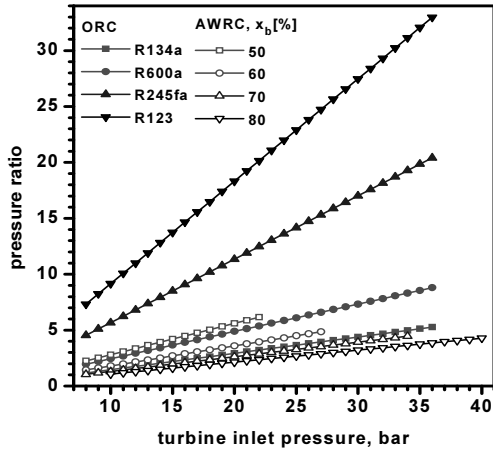


Fig. 9 Variations of pressure ratio

고정된 상태에서는 터빈입구압력에 따라 비례해서 증가한다. ORC에서 압력비는 R134a, R600a, R245fa 및 R123의 임계온도가 높아지는 순으로 높아지며 AWRC에서는 암모니아 농도가 낮아질수록 높아진다. 시스템의 압력비는 대체로 AWRC의 경우가 ORC의 경우보다 낮고 이는 운전비용이 더 절감될 수 있음을 의미한다.

Fig. 10에서는 터빈입구압력에 따라서 1MW 출력당 터빈출구에서 작동유체 체적유량의 변화를 보여 준다. 터빈출구 유량은 ORC와 AWRC의 경우 모두 터빈입구압력이 높아질수록 작아지며 터빈 설비비의 감소를 의미한다. ORC에서 터빈출구 유량은 R134a, R600a, R245fa 및 R123의 임계온도가 높아지는 순으로 증가한다. 단위출력당 AWRC의 터빈출구 유량이 ORC의 경우에 비해 매우 작는데 이는 AWRC의 설비비용이 훨씬 더 낮을 수 있음을 뜻한다.

4. 결 론

본 연구에서는 현열 에너지 형태의 200°C 저온 열원을 사용하는 ORC와 AWRC에서 작동유체나 암모니아 농도, 그리고 터빈입구압력의 변화에 따른 열역학적 성능을 비교 해석하였다. ORC에서는 R134a, R600a,

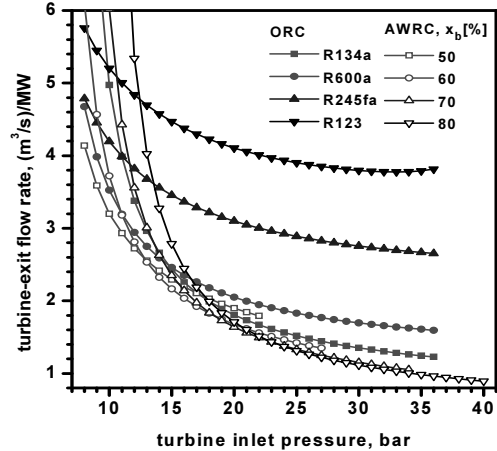


Fig. 10 Variations of turbine-exit flow rate

R245fa 및 R123의 네 가지 작동유체를, AWRC에서는 50%, 60%, 70% 및 80%의 암모니아 농도를 고려 하였다. ORC는 여러 가지 장점들을 가지고 있으나 열원온도나 운전조건에 따라 시스템의 열역학적 성능이 최대가 되는 작동유체가 변하고 작동유체에 따라서 터빈과 펌프의 설계와 생산이 따로되어야 하기 때문에 경제성을 확보하는 데에 어려움이 있다. AWRC는 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 하기 때문에 독성물질을 관리해야 하는 어려움이 있고 주어진 열원 유체 유량으로 생산할 수 있는 출력이나 열효율이 ORC에 비해 감소할 수 있다. 그러나 암모니아의 농도에 따라 작동유체의 특성이 변화하며, 작동유체의 질량 유량, 터빈과 펌프의 압력비와 단위출력당 터빈출구에서의 체적유량이 ORC에 비해 작다. 따라서 설비나 운전 경비가 절감될 수 있고 물 펌프나 스팀 터빈을 그대로 활용할 수 있어 저온 열원 활용을 위한 가능성이 있다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 엔지니어링 개발연구센터의 지원을 받아 수행된 연구임(과제 번호 : N0000990).

References

1. S. Ogriseck, "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study", *Applied Ther. Eng.*, Vol. 29, 2009, pp. 2843-2848.
2. J. Bao and L. Zhao, "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 24, 2013, pp. 325-342.
3. V. A. Prisyazhniuk, "Alternative trends in development of thermal power plant", *Applied Therm. Eng.*, Vol. 28, 2008, pp. 190-194.
4. P. Roy, M. Desilets, N. Galanis, H. Nesreddine, and E. Cayer, "Thermodynamic analysis of a power cycle using a low-temperature source and a binary $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ mixture as working fluid", *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 49, 2010, pp. 48-58.
5. P. A. Lolos and E. D. Rogdakis, "A Kalina power cycle driven by renewable energy sources", *Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 457-464.
6. C. Zamfirescu and I. Dincer, "Thermodynamic analysis of a novel ammonia-water trilateral Rankine cycle", *Thermochim. Acta*, Vol. 477, 2008, pp. 7-15.
7. P. Roy, M. Desilets, N. Galanis, H. Nesreddine, and E. Cayer, "Thermodynamic analysis of a power cycle using a low-temperature source and a binary $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ mixture as working fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 49, 2010, pp. 48-58.
8. W. R. Wagar, C. Zamfirescu, and I. Dincer, "Thermodynamic performance assessment of an ammonia-water Rankine cycle for power and heat production", *Energy Convers. Manag.*, Vol. 51, 2010, pp. 2501-2509.
9. K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", *Thermochim. Acta*, Vol. 530, 2012, pp. 7-16.
10. K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Comparative exergy analysis of ammonia-water based Rankine cycles with and without regeneration", *Int. J. Exergy*, Vol. 12, 2013, pp. 344-361.
11. K. H. Kim, H. J. Ko, and K. Kim, "Assessment of pinch point characteristics in heat exchangers and condensers of ammonia-water based power cycles", *Appl. Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 970-981.
12. K. H. Kim and K. C. Kim, "Thermodynamic performance analysis of a combined power cycle using low grade heat source and LNG cold energy", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 70, 2014, pp. 50-60.
13. T. Yang, G. J. Chen, and T. M. Gou, "Extension of the Wong-Sandler mixing rule to the three-parameter Patel-Teja equation of state: Application up to the near-critical region", *Chem. Eng. J.*, Vol. 67, 1997, pp. 27-36.
14. J. Gao, L. D. Li, S. G. Ru, "Vapor-liquid equilibria calculation for asymmetric systems using Patel-Teja equation of state with a new mixing rule", *Fluid Phase Equilibrium*, Vol. 224, 2004, pp. 213-219.
15. C. L. Yaws, "Chemical Properties Handbook," McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1999.
16. F. Xu, D.Y. Goswami, "Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power cycle application", *Energy*, Vol. 24, 1999, pp. 525-536.