

저온 열원의 활용을 위한 칼리나/흡수냉동 복합사이클의 성능 해석

김경훈 · 고형중 · 정영관[†]

금오공과대학교 기계공학과

Performance Analysis of a Combined Cycle of Kalina and Absorption Refrigeration for Recovery of Low-Temperature Heat Source

KYOUNG HOON KIM, HYUNG JONG KO, YOUNG GUAN JUNG[†]

Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

[†]Corresponding author :
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 27 September, 2018

Revised 19 October, 2018

Accepted 30 October, 2018

Abstract >> Recently, the power and refrigeration cogeneration based on Kalina cycle has attracted much attention for more efficient utilization of low-grade energy. This study presents a thermodynamic performance analysis of a cogeneration cycle of power and absorption refrigeration based on Kalina cycle. The cycle combines Kalina cycle (KCS-11) and absorption cycles by adding a condenser and an evaporator between turbine and absorber. The effects of ammonia mass fraction and separation pressure were investigated on the system performance of the system. Results showed that the energy utilization of the system could be greatly improved compared to the basic Kalina cycle.

Key words : Power and refrigeration cogeneration(동력 및 냉동 병합생산), Kalina cycle(칼리나 사이클), Low-grade heat source(저등급 열원), Ammonia fraction(암모니아 분률)

1. 서론

1984년에 Kalina는 전통적인 스팀 랭킨사이클을 대체해서 저등급 열원을 효율적으로 변환할 수 있는 새로운 사이클을 제안하였다. 그후 칼리나 사이클에 대한 많은 연구가 수행되어 왔고 특정 응용을 위하여 다양한 변형이 제안되어 왔다¹⁾. 칼리나 사이클의 작동유체는 암모니아-물 혼합물이다. 암모니아는 물보다 상대적으로 낮은 비등점을 가지며, 비공비 혼합물의 특성으로 인하여 열교환기에서의 역서지 손실

을 효과적으로 감소시킬 수 있는 등 장점들을 가지고 있다^{2,3)}.

열동력 사이클에서 동력 생산뿐 아니라 스팀이나 온수 또는 냉동 등을 병합 생산하면 시스템의 효율을 획기적으로 높일 수 있다⁴⁾. 암모니아-물 혼합물은 LiBr/H₂O와 함께 흡수식 냉동 시스템에서 많이 사용되고 있으며, 에너지의 효율적인 이용을 위하여 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력/냉동 병합생산 사이클이 최근 들어 주목받고 있다⁵⁾.

Goswami⁶⁾은 칼리나 사이클에서 터빈 뒤에 증발

기를 설치하는 동력/냉동 병합생산 사이클을 제안하였으며, Zheng 등⁷⁾은 정류기와 리보일러를 채용해서 효율을 높인 동력/냉동 복합사이클을 제안하였다. Hua 등⁸⁾은 중저온 폐열에 의하여 구동되고 증발기와 과냉기가 추가된 수정 칼리나 사이클을 제안하였고, Rashidi와 Yoo⁹⁾는 이젝터 냉각을 칼리나 사이클과 통합한 동력/흡수냉동 복합사이클을 제안하였다. Zhang 등¹⁰⁾은 발전과 냉동사이클이 케스케이드로 결합된 동력/흡수냉동 복합사이클을 해석하였다.

그러나 이러한 칼리나 복합사이클들은 저온의 폐열 등으로 구동하기에는 대부분의 시스템이 상대적으로 복잡하고, 또 Goswami의 사이클은 증발기에 들어가는 작동유체의 건도가 높아 냉동 성능에 제약이 있을 수 있다. 본 연구에서는 KCS-11 칼리나 사이클에서 터빈과 흡수기 사이에 응축기와 증발기를 직렬로 추가한 동력/흡수냉동 복합사이클의 성능을 해석한다. 시스템의 주요 변수로서 작동유체의 암모니아 분률과 분리의 압력 등에 따른 시스템의 성능 특성을 해석하고자 한다.

2. 시스템 해석

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 KCS-11 칼리나 사이클의 터빈 뒤에 응축기와 증발기가 결합된 동력/흡수냉동 복합사이클에 대하여 해석한다. 해석을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다. 시스템은 온도 T_s 와 질량유량 m_s 인 현열 에너지 형태의 저등급 열원에 의하여 구동되며 분리기에서의 온도와 압력은 각각 T_H 및 P_H 라 설정한다. 펌프와 터빈에서의 등엔트로피 효율은 각각 η_p 와 η_t 로 일정하며 이들과 팽창밸브를 제외한 곳에서 압력변화는 무시한다. 각 열교환기에서 고온과 저온 유체의 최소 온도차는 설정한 핀치포인트 온도차 ΔT_{pp} 에 도달한다고 가정한다. 본 연구에서 암모니아-물 혼합물의 열역학 상태량은 Xu와 Goswami¹¹⁾와 Kim과 Han²⁾의 방법을 따른다.

흡수기를 나온 작동유체는 온도 T_L , 암모니아 질량분률 x_b 의 포화액(상태1)이라 가정하며 이때 유체

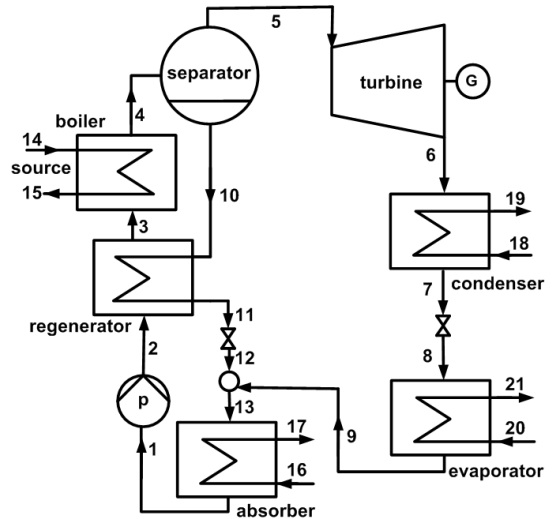


Fig. 1. Schematic diagram of the system

압력 P_L 은 시스템의 저압이 된다. 펌프에서 압력 P_H 까지 가압되고(상태2) 재생기에서 예열된 다음(상태3) 열교환기를 통하여 분리기 온도까지 가열된다(상태4). 작동유체는 분리기에서 고농도의 포화증기(상태5)와 저농도의 포화액(상태10)으로 분리된다. 분리기를 나온 액체는 재생기에서 보일러로 보내는 작동유체를 예열시키고(상태11) 흡수기 압력까지 교축 팽창된다(상태12). 터빈에 들어간 증기는 응축기 압력까지 팽창하면서 동력을 생산한 후(상태6) 응축기에서 포화액 상태로 나오며(상태7) 이때 작동유체의 포화압력 P_M 은 시스템의 중간압력이 된다. 작동유체는 증발기에서 흡열을 통하여 냉수를 제조하고(상태8) 상태12의 작동유체와 혼합되어(상태13) 흡수기에 들어간다.

열원 유체의 질량유량이 m_s 라 할 때 열원유체의 출구온도 T_{15} 는 핀치온도차 조건으로 정해지며, 펌프, 터빈 및 재생기에서 작동유체의 질량유량과 냉수의 질량유량 m_w , m_t , m_r 및 m_e 는 다음과 같이 구한다.

$$\frac{m_w}{m_s} = \frac{h_{14} - h_{15}}{h_4 - h_3} \quad (1)$$

$$\frac{m_t}{m_w} = \frac{h_4 - h_{10}}{h_5 - h_{10}} \quad (2)$$

$$m_r = m_w - m_t \quad (3)$$

$$\frac{m_e}{m_t} = \frac{h_9 - h_8}{h_{20} - h_{21}} \quad (4)$$

여기에서 h 는 비엔탈피이다. 시스템 유입열 Q_s , 터빈 출력 W_t , 펌프 동력 W_p , 시스템 출력 W_n , 냉동용량 Q_c , 유용에너지 E_n 은 다음과 같이 구한다.

$$Q_s = m_w(h_4 - h_3) \quad (5)$$

$$W_t = m_t(h_5 - h_6) \quad (6)$$

$$W_p = m_w(h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$W_n = W_t - W_p \quad (8)$$

$$Q_c = m_t(h_9 - h_8) \quad (9)$$

$$E_n = W_n + Q_c \quad (10)$$

시스템 유입열에 대한 시스템 출력, 냉동 및 유용 에너지 효율 $\eta_{th,w}$, $\eta_{th,e}$, $\eta_{th,tot}$ 는 각각 다음과 같이 구한다.

$$\eta_{th,w} = W_n / Q_s \quad (11)$$

$$\eta_{th,e} = Q_c / Q_s \quad (12)$$

$$\eta_{th,tot} = E_n / Q_s \quad (13)$$

3. 결과 및 고찰

열원유체는 온도 $T_s=150^\circ\text{C}$, 질량유량 $m_s=1 \text{ kg/s}$ 의 물이라고 가정하고 시스템의 주요 기본 변수값들은

Table 1. Thermodynamic properties for $P_H=20 \text{ bar}$

State	y	x (%)	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	m (kg/s)
1	1.00	38.0	30.0	1.77	0.0	0.00	0.42
2	1.00	38.0	30.2	20.00	2.5	0.00	0.42
3	1.00	38.0	115.9	20.00	388.5	1.12	0.42
4	1.00	38.0	135.0	20.00	670.0	1.84	0.42
5	0.13	86.1	135.0	20.00	1,783.2	4.89	0.06
6	1.00	86.1	107.8	10.14	1,687.1	4.96	0.06
7	1.00	86.1	30.0	10.14	129.9	0.12	0.06
8	1.00	86.1	-17.6	1.77	129.9	0.21	0.06
9	1.00	86.1	15.0	1.77	1,030.6	3.68	0.06
10	0.87	30.5	135.0	20.00	496.9	1.36	0.37
11	1.00	30.5	35.2	20.00	50.9	0.11	0.37
12	1.00	30.5	35.6	1.77	50.9	0.12	0.37
13	1.00	38.0	39.8	1.77	182.7	0.60	0.42
14			150.0		555.4	1.57	1.00
15			122.1		436.3	1.28	1.00
16			20.0		0.0	0.00	1.25
17			34.8		62.0	0.21	1.25
18			20.0		0.0	0.00	0.69
19			50.8		128.3	0.42	0.69
20			20.0		0.0	0.00	2.44
21			15.0		-21.0	-0.07	2.44

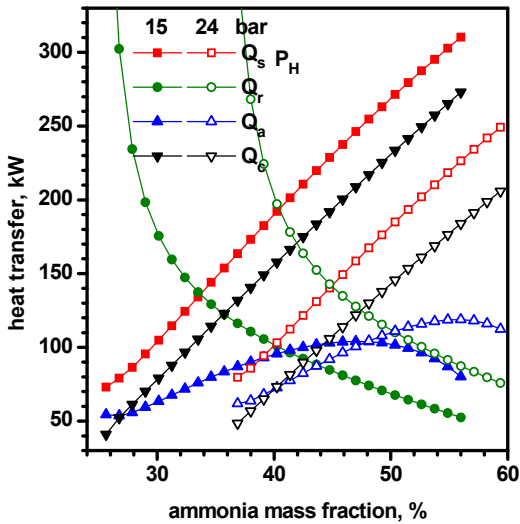


Fig. 2. Effects of ammonia mass fraction on heat transfer rates

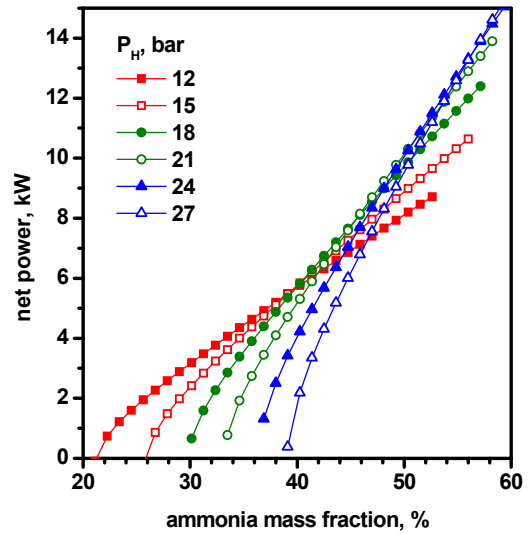


Fig. 4. Effects of ammonia mass fraction on net power for various separator pressures

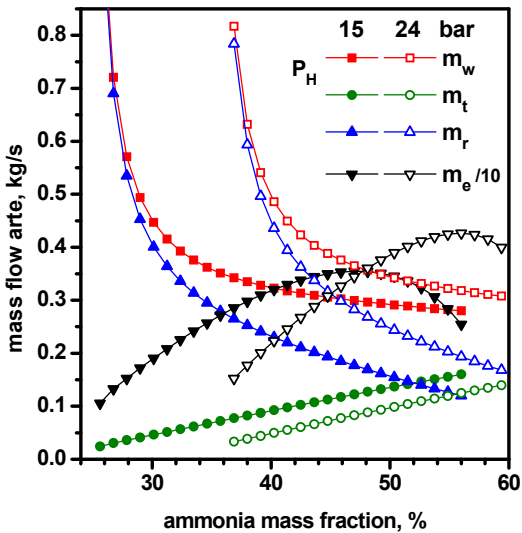


Fig. 3. Effects of ammonia mass fraction on mass flow rates

다음과 같이 설정한다: 열교환기 출구온도 $T_H=13$ $^{\circ}C$, 응축온도 $T_L=30$ $^{\circ}C$, 냉각수 온도 $T_C=20$ $^{\circ}C$, 냉수 입구온도 $T_{20}=20$ $^{\circ}C$, 냉수 출구온도 $T_{21}=15$ $^{\circ}C$, 핀치 온도차 $\Delta T_{pp}=5$ $^{\circ}C$, 펌프효율 $\eta_p=80\%$, 터빈효율 $\eta_t=80\%$. Table 1에서는 $P_H=20$ bar일 때 각 지점에서 열역학 상태량과 질량유량을 보여준다.

Fig. 2에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 열

전달에 미치는 영향을 보여준다. 암모니아 분율이 증가하면 열교환기에서의 열전달 Q_s 와 응축기에서의 열전달 Q_e 는 증가하나 재생기에서의 열전달 Q_r 은 감소하고 흡수기에서의 열전달 Q_a 는 암모니아 분율에 대하여 극대값을 갖는다. 암모니아 분율이 증가하면 증발온도가 낮아지고 이에 따라 열원유체의 출구온도가 낮아지므로 시스템 유입열이 증가하게 된다. 분리기 압력이 높아지면 증발온도가 높아지면서 열원유체의 출구온도도 올라가고 이에 따라 유입열이 감소한다.

Fig. 3에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 질량유량에 미치는 영향을 보여준다. 암모니아 분율이 증가하면 펌프 및 재생기서의 유량은 증가하나 터빈에서의 유량은 감소하며 냉수 유량은 암모니아 분율에 대하여 극대값을 갖는다. 분리기에서의 압력이 증가하는 경우에도 펌프 및 재생기서의 유량은 증가하나 터빈에서의 유량은 감소한다.

Fig. 4에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 시스템 출력에 미치는 영향을 보여준다. 암모니아 분율이 증가하면 시스템 출력은 증가하나 그 증가율은 분리기 압력이 높아질수록 감소한다. 따라서 시스템 출력은 암모니아 분율이 45%보다 낮은 영역에서는

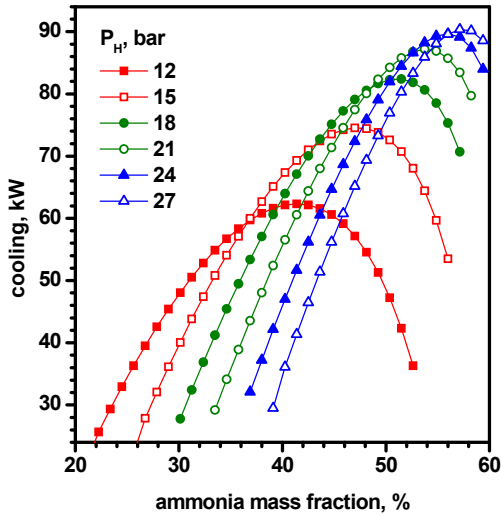


Fig. 5. Effects of ammonia mass fraction on cooling rate for various separator pressures

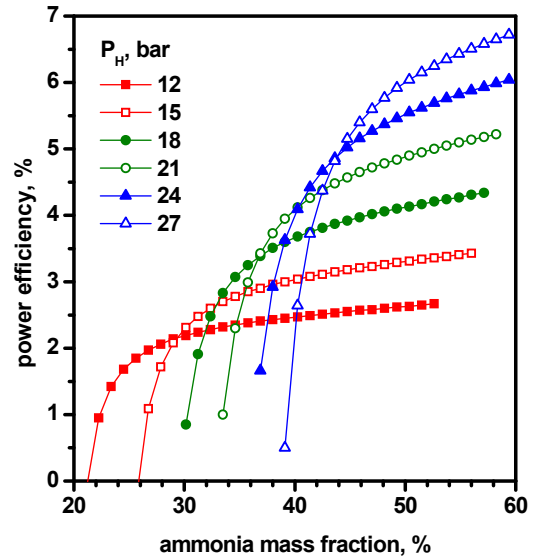


Fig. 7. Effects of ammonia mass fraction on power efficiency for various separator pressures

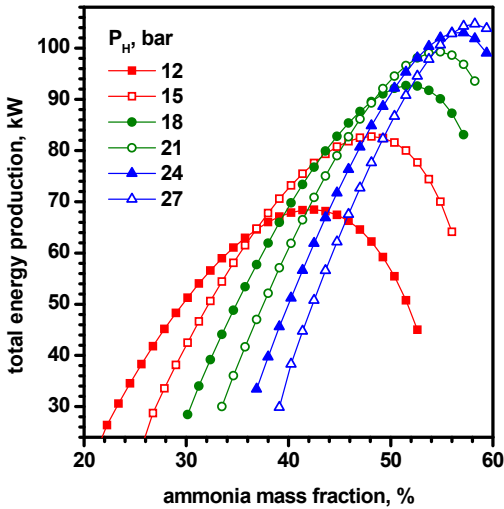


Fig. 6. Effects of ammonia mass fraction on total energy production for various separator pressures

분리기 압력이 높아질수록 감소하고, 45%보다 높은 영역에서는 반대로 분리기 압력이 높아질수록 증가한다.

Fig. 5에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 냉동용량에 미치는 영향을 보여준다. 냉동용량은 암모니아 분율에 대하여 극대값을 가진다. 이는 암모니아 분율이 증가하면 냉동효과, 즉 작동유체 단위질량당

흡열량은 감소하나 질량유량이 증가하기 때문에 증가요인과 감소요인을 함께 가지고 있기 때문이다. 냉동용량이 극대가 되는 암모니아 분율은 분리기 압력에 따라 높아진다. 또한 분리기 압력이 증가하면 냉동효과는 증가하지만 질량유량은 감소하는데, 암모니아 분율이 55% 이하에서 냉동용량은 분리기 압력에 따라 단순 증가한다.

Fig. 6에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 시스템 유용에너지에 미치는 영향을 보여준다. 유용 에너지는 시스템 출력과 냉동용량의 합이고 시스템 출력은 암모니아 분율에 따라 단순 증가하지만 출력의 크기가 냉동용량에 비하여 작아서 시스템의 유용 에너지는 시스템의 냉동용량과 거동이 유사해서 암모니아 분율과 분리기 압력에 대하여 극대값을 갖는다.

Fig. 7에서는 암모니아 분율과 분리기 압력이 시스템의 동력 효율에 미치는 영향을 보여준다. 동력 효율은 시스템의 유입열에 대한 출력의 비로 정의되고 암모니아 분율이 높아질수록 출력이 단순 증가하나 시스템의 유입열도 증가한다. 이에 따라 동력효율은 암모니아 분율이나 분리기 압력이 높아질수록 단순 증가한다.

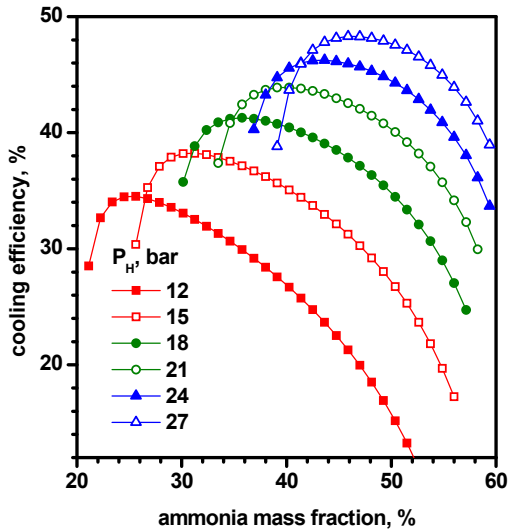


Fig. 8. Effects of ammonia mass fraction on cooling efficiency for various separator pressures

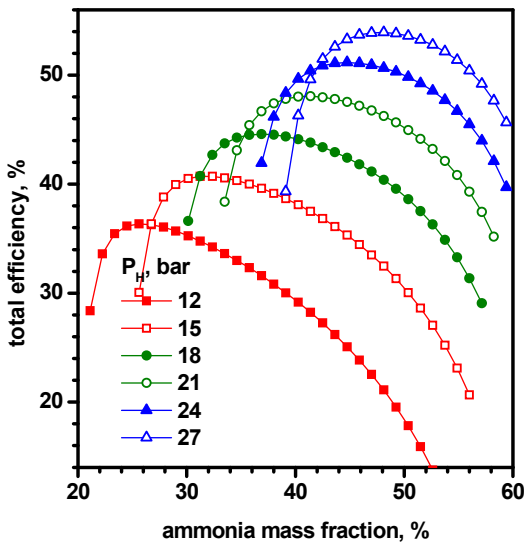


Fig. 9. Effects of T_{LB} on the power productions of HPT and LPT for various working fluids

Fig. 8과 Fig. 9에서는 암모니아 분율과 분리기 압력의 변화가 냉동 효율과 유용 에너지 효율에 미치는 영향을 보여준다. 냉동 효율과 유용 에너지 효율은 각각 냉동용량과 유용 에너지의 시스템 유입열에 대한 비로 정의된다. 암모니아 분율에 대해서 냉동용량과 유용에너지는 극대값을 가지며, 시스템 유입열

은 단순 증가하기 때문에 냉동 효율과 유용 에너지 효율도 암모니아 효율에 대하여 극대값을 가진다. 하지만 냉동 효율과 유용 에너지 효율이 극대가 되는 최적의 암모니아 분율은 냉동용량이나 유용 에너지가 극대가 되는 최적의 암모니아 분율보다 훨씬 낮으며, 분리기의 압력이 높아질수록 증가한다. 그리고 냉동 효율과 유용 에너지 효율은 모두 분리기 압력이 증가할수록 높아진다.

4. 결론

본 연구에서는 150°C의 저온 열원을 이용하고 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력 및 흡수 냉동병합 생산 사이클의 열역학적 성능 특성을 해석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 암모니아 질량 분율과 분리기 압력은 시스템의 출력, 냉동용량이나 효율 등 열역학적 성능에 큰 영향을 미친다.
- 2) 시스템 출력은 암모니아 질량 분율에 따라 증가하나 분리기 압력에 대하여 극대값을 갖고, 냉동용량이나 유용 에너지는 암모니아 질량 분율에 따라 극대값을 가지나 분리기 압력에 따라 증가한다.
- 3) 시스템의 동력 효율과 유용 에너지 효율은 암모니아 분율에 따라 극대값을 가지나 냉동 효율은 암모니아 분율에 따라 증가한다. 세 효율 모두 분리기 압력에 따라 증가한다.
- 4) 저온 열원을 이용해서 전기만 생산하는 경우 효율이 약 6%이나 전기와 흡수냉동을 병합생산하는 경우 효율은 약 48%로 대폭 향상된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다 (NRF-2016R1D1A1B03935888).

References

1. X. X. Zhang, M. G. He, and Y. Zhang, "A review of research on the Kalina cycle", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 16, 2012, pp. 5309-5318.
2. K. H. Kim and C. H. Han, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", *Thermochimica. Acta.*, Vol. 530, 2012, pp. 7-16.
3. 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", *Applied Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 970-981.
4. S. Ogriseck, "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 29, 2009, pp. 2843-2848.
5. Z. Yu, J. Han, H. Liu, and H. Zhao, "Theoretical study on a novel ammonia-water cogeneration system with adjustable cooling to power ratios", *Appl. Energy*, Vol. 122, 2014, pp. 53-61.
6. D. Y. Goswami, "Solar thermal power technology: present status and ideas for the future", *Energy Sources*, Vol. 20, 1998, pp. 137-145.
7. D. X. Zheng, B. Chen, Y. Qi, and H. G. Jin, "Thermodynamic analysis of a novel absorption power/cooling combined cycle", *Appl Energy*, Vol. 83, 2006, pp. 311-323.
8. J. Y. Hua, Y. P. Chen, Y. D. Wang, and A. P. Roskilly, "Thermodynamic analysis of ammonia-water power/chilling cogeneration cycle with low-grade waste heat", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 64, 2014, pp. 483-490.
9. J. Rashidi and C. K. Yoo, "A novel Kalina power-cooling cycle with an ejector absorption refrigeration cycle: Thermodynamic modelling and pinch analysis", *Energy Converse Manage*, Vol. 162, 2018, pp. 225-238.
10. S. Zhang, Y. Chen, J. Wu, and Z. Zhu, "Thermodynamic analysis on a modified Kalina cycle with parallel cogeneration of power and refrigeration", *Energy Converse Manage*, Vol. 163, 2018, pp. 1-12.
11. F. Xu and D. Y. Goswami, "Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power cycle application", *Energy*, Vol. 24, 1999, pp. 525-536.