

유기 플래쉬 사이클(OFC)의 열역학적 성능 특성

김경훈 · 정영관 · 박상희[†]
금오공과대학교 기계공학과

Characteristics of Thermodynamic Performance of Organic Flash Cycle (OFC)

KYOUNGHOON KIM, YOUNGGUAN JUNG, SANGHEE PARK[†]

Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro,
Gumi, Gyeongbuk, 730-701, Korea

Abstract >> Recently a novel cycle named organic flash cycle (OFC) has been proposed which has improved potential for power generation from low-temperature heat sources. This study carries out thermodynamic performance analysis of OFC using various working fluids for recovery of low-grade heat sources in the form of sensible energy. Special attention is focused on the optimum flash temperature at which the exergy efficiency has the maximum value. Under the optimal conditions with respect to the flash temperature, the thermodynamic performances of important system variables including mass flow ratio, separation ratio, heat addition, specific volume flow rate at turbine exit, and exergy efficiency are thoroughly investigated. Results show that the exergy efficiency has a peak value with respect to the flash temperature and the optimum working fluid which shows the best exergy efficiency varies with the operating conditions.

Key words : Low-temperature heat source(저온 열원), Organic flash cycle(유기 플래쉬 사이클), Flash temperature (플래쉬 온도), Exergy efficiency(엑서지 효율), Working fluid(작동 유체)

Nomenclature

e : specific exergy, kJ/kg
 h : specific enthalpy, kJ/kg
 P : pressure, bar
 q : specific heat, kJ/kg
 m_w : mass flow ratio to source flow
 T : temperature, °C
 T_C : coolant temperature, °C
 T_F : flash evaporating temperature(FET), °C

T_H : heating temperature, °C
 T_L : condensing temperature, °C
 T_S : source temperature, °C
 s : specific entropy, kJ/kg·K
 v_e : specific volume at turbine exit, (m³/s)/kW
 w_{net} : specific net work, kJ/kg
 y_{fe} : separation ratio at flash evaporator
 ΔT_{pp} : pinch point temperature difference, °C
 η_e : exergy efficiency
 η_p : isentropic efficiency of pump
 η_t : isentropic efficiency of turbine

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

[접수일 : 2013.1.30 수정일 : 2012.2.19 게재확정일 : 2013.2.28]

Copyright © 2013 KHNES

Subscripts

- 0 : dead state
 s : source
 w : working fluid

1. 서 론

지구 온난화와 관련된 전 세계적인 환경 문제와 화석 연료 가격의 상승으로 인하여 신재생 에너지의 활용이 더욱 주목받고 있으며 열원으로부터 전기 등 유용한 에너지로의 변환 효율의 향상이 전 세계적인 주요 관심거리가 되고 있다. 물을 작동유체로 하는 전통적인 랭킨 사이클은 열원의 온도가 약 370°C 이하로 내려가면 경제성을 잃게 되어 대안이 필요하게 된다. 특히 현열 에너지 형태의 저온 열원은 열을 전달하는 과정에서 열원 유체의 온도가 변화하기 때문에 열교환기 내 온도의 불균형과 엑서지 파괴가 심화되어 에너지 변환 효율이 낮아지게 된다. 이러한 상황에서 물과 암모니아의 비공비 혼합물을 작동유체로 하는 동력 생산시스템이나 물 대신 다양한 유기 물질을 작동유체로 하는 유기랭킨사이클(organic rankine cycle, ORC)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁻³⁾.

ORC는 최근 20여년간 활발하게 연구되고 있는데, Hung 등⁴⁾은 열원의 온도가 매우 낮을 때 ORC의 특성을 조사하였으며, Delgadotorres 등⁵⁾은 ORC를 채용한 태양열 해수 담수화 플랜트에서 장치에서의 최적 운전 조건에 대해 연구하였다. Tchanche 등⁶⁾은 태양열을 열원으로 하는 ORC에서 열효율뿐만 아니라 작동유체 종류에 따른 다양한 열역학적 특성을 조사하였다. Kim⁷⁾은 친환경적인 아홉 가지 작동유체를 대상으로 다양한 관점에서 열역학적 성질들을 비교 분석하고, 특히 터빈입구 온도가 매우 낮아질 때의 거동을 분석하였으며, Jeong 등⁸⁾은 LNG를 연료로 작동되는 큰 규모의 흡수 냉각기를 제안하였다.

ORC는 발전용 이외에도 응용 분야가 많은데 Manolakos 등^{9,10)}은 태양 에너지를 열원으로 이용하여 ORC를 구동시키고, 발생된 동력은 RO(reverse osmosis) 시

스템의 고압 펌프의 운전 동력으로 활용하여 담수를 얻는 시스템에 대해 연구하였다. Sun¹¹⁾은 태양열을 이용한 복합 분사-증기 압축 사이클에서 공기 조화 와 냉동에 대해서 연구하였으며, Vidal 등¹²⁾은 태양 열을 이용한 복합 분사-증발 압축 사이클의 냉각 응용 최적화를 시뮬레이션 하였다. Wang 등¹³⁾, Kim 등¹⁴⁾은 ORC-VCC(vapor compression cycle) 복합 사이클에 대한 열역학적 성능 특성에 대해 연구하였다.

최근 들어 Ho 등^{15,16)}은 새로운 유기 플래쉬 사이클(organic flash cycle, OFC)를 제안하였다. 이 사이클에서는 열원으로부터의 열전달을 통해 작동 유체를 포화 액까지 가열시킨 후 플래쉬 증발기(flash evaporator)를 통해 중간 압력까지 교축시켜 증기 부분만을 터빈에 공급해서 전기를 생산한다. 이 사이클에서는 작동유체가 열교환기 내에서 액체 상태를 유지하기 때문에 열관류율을 높게 유지할 수 있고 열원과 작동유체 사이의 온도차 불균일을 줄일 수 있어 저온 열원을 사용하는 동력생산 시스템에서 시스템의 성능을 개선할 수 있는 잠재성을 가지고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 현열 형태의 저온 열원의 변환을 위한 OFC의 열역학적 성능 특성을 분석한다. 다양한 작동 유체에 대해 플래쉬 증발 온도에 따른 성능 특성을 조사하고 엑서지 효율이 최대가 되는 플래쉬 온도 조건을 분석한다. 또한 엑서지 효율이 최대가 되는 플래쉬 온도 조건에서 작동유체와 가열 온도에 따른 열원유체와 작동유체의 질량유량비, 플래쉬 증발기에서 기액 분리비, 시스템의 유입열 및 엑서지 효율 등의 성능 특성에 대해 조사한다.

2. 시스템 해석

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 현열 형태의 저온 열원을 사용하고, 응축기, 펌프, 열교환기, 플래쉬 증발기(flash evaporator), 그리고 터빈으로 구성된 OFC의 열역학적 성능 특성에 대해 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 시

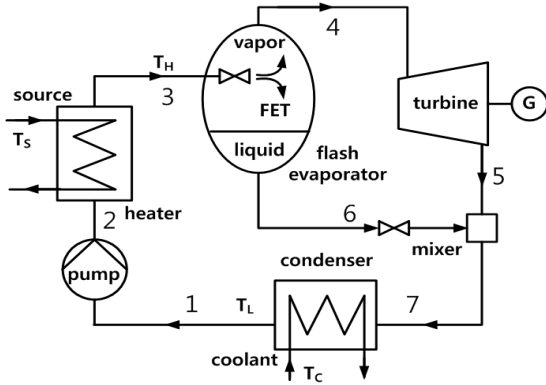


Fig. 1 Schematic diagram of the system

시스템의 저압이 된다. 펌프에서 작동유체는 열교환기 압까지 가압되어(상태 2), 열교환기로 들어가 온도 T_s 의 열원유체를 통해 온도 T_H 의 포화액 상태까지 가열된다(상태 3). 열교환기에서 작동유체의 압력은 온도 T_H 의 포화압력 P_H 로서 시스템의 고압이 된다. 작동유체는 교축 팽창되어 온도 T_b 의 플래쉬 탱크에서 증기부분(상태 4)와 액체 부분(상태 6)으로 기액 분리된다. 플래쉬 탱크압력은 온도 T_f 의 포화압력 P_f 로서 시스템의 중간압력이 된다. 플래쉬 탱크의 증기 부분은 터빈에서 응축기 압력까지 팽창되고(상태 5), 액체 부분은 교축팽창되어 혼합실에서 다시 혼합되어 되어 응축기로 들어간다(상태 7).

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

열원 유체의 단위 질량을 기준으로 시스템 열유입량을 q_{in} , 순생산일을 w_{net} , 작동유체의 엑서지를 e , 그리고 열원에 의한 엑서지 유입량을 e_m 이라 하면 이들은 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$q_{in} = m_w(h_3 - h_2) \quad (1)$$

Table 1 Basic data for working fluids

Substance	M (kg/kmol)	T_{cr} (K)	P_{cr} (bar)	ω
R22	86.468	369.30	49.71	0.219
R134a	102.031	380.00	36.90	0.239
R152a	66.051	386.60	44.99	0.263
propane	44.096	396.82	42.49	0.152
isobutane	58.123	408.14	36.48	0.177
butane	58.123	425.18	37.97	0.199
R123	136.467	456.90	36.74	0.282
isopentane	72.150	462.43	33.81	0.228

$$w_{\neq t} = y_{fe} m_w (h_4 - h_5) \quad (2)$$

$$e_{in} = c_{ps} \left[T_s - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_s}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

$$e = m_w [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (4)$$

여기에서 y_{fe} 는 온도 T_f 에서 작동유체 포화혼합물의 건도이며 플래쉬 탱크의 증기와 액체의 질량 분리비가 된다. 또한 c_{ps} 및 하첨자 0은 각각 열원유체의 정압비열 및 사망상태를 나타낸다. 그러면 엑서지 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ex} = \frac{w_{\neq t}}{e_{in}} \quad (5)$$

본 연구에서는 소수의 기초 데이터를 사용하여 다양한 물질들의 열역학적 상태량 계산에 신뢰성이 인정된 Patel-Teja의 상태방정식을 이용하여 시스템의 열역학적 성능을 해석하며^{17,18)} 작동유체에 대한 분자량 M , 임계온도 T_{cr} , 임계압력 P_{cr} , 이심인자 ω 등 기본적인 열역학적 성질들은 Table 1에 주어진다. 작동유체로서는 임계온도가 낮은 순으로 R22, R134a, R152a, 프로판(propane), 이소부탄(isobutane), 부탄(butane), R123 및 이소펜탄(isopentane)의 여덟가지 물질을 고려한다.

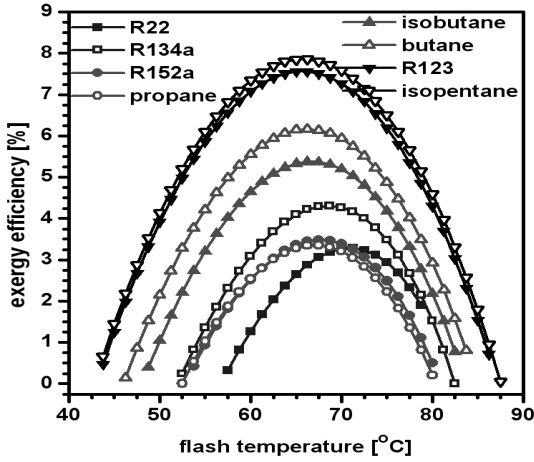


Fig. 2 Plot of exergy efficiency against flash temperature for various working fluids

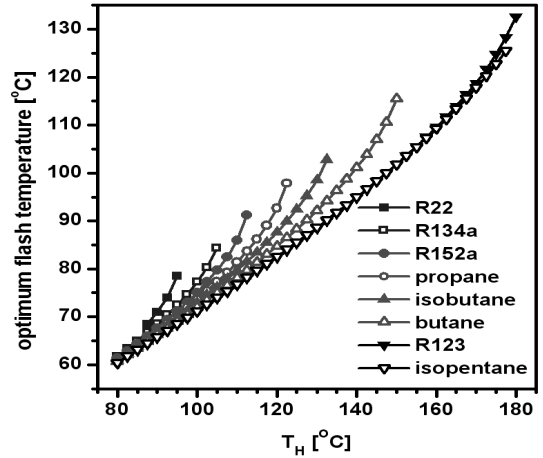


Fig. 3 Plot of optimum flash temperature against T_H for various working fluids

3. 결과 및 토의

시스템의 주요 변수 값들은 기본값으로서 $T_s = 300^\circ\text{C}$, $T_C = T_0 = 15^\circ\text{C}$, $T_L = 40^\circ\text{C}$, $\Delta T_{pp} = 10^\circ\text{C}$, $\eta_p = 80\%$, $\eta_t = 80\%$, $\eta_c = 80\%$ 을 사용하며, 열원 유체는 물이다. Fig. 2에서는 열교환기에서 작동유체를 $T_H = 90^\circ\text{C}$ 까지 가열했을 때 플래쉬 온도 변화에 따른 엑서지 효율의 변화를 보여준다. 고정된 가열온도에서 엑서지 효율은 플래쉬 온도의 변화에 따라 최대값을 갖는다. 이는 고정된 가열온도에서 플래쉬 온도가 높아지면 가스터빈 압력비가 증가해 엑서지 효율의 증가 요인이 있는 반면에 플래쉬 증발기에서 기액분리시 증기의 질량 비율이 낮아져 가스터빈으로의 질량 유량이 감소함으로써 엑서지 효율의 감소하는 요인도 동시에 있기 때문이다. 고정된 플래쉬 온도에서 최대 엑서지 효율은 이소펜탄, R123, 부탄, 이소부탄, R134a, R152a, 프로판, R22 순이 된다.

플래쉬 온도의 변화에 따라 엑서지 효율의 최대값이 존재하므로 Fig. 3~9에서는 주어진 가열온도에서 플래쉬 온도에 따라 엑서지 효율이 최고가 되는 조건에서 시스템 변수들의 특성을 조사한다. Fig. 3에서는 가열온도 T_H 가 80°C 에서 180°C 까지 변할 때 엑서지 효율이 최대가 되는 최적 플래쉬 온도의 변

화를 보여준다. 최적 플래쉬 온도는 가열온도 T_H 의 증가에 따라 함께 증가한다. 그런데 본 사이클에서는 가열온도를 그 물질의 임계온도보다 높게 운영할 수 없어 가열온도의 최고값이 그 물질의 임계온도가 된다. 따라서 엑서지 효율은 가열온도 T_H 가 임계온도가 될 때 최고값을 갖게 된다. 또한 고정된 가열온도에서 최적의 플래쉬 온도는 임계온도가 낮은 물질일수록 높지만 전술한 바와 같이 임계온도가 낮아 사용할 수 있는 가열온도의 상한도 낮아진다. Fig. 4에서

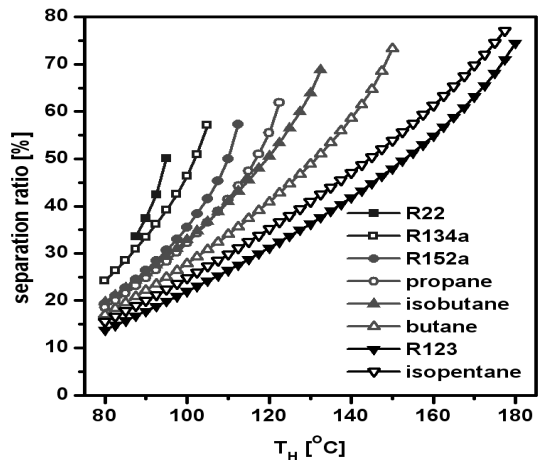


Fig. 4 Plot of separation ratio against T_H for various working fluids

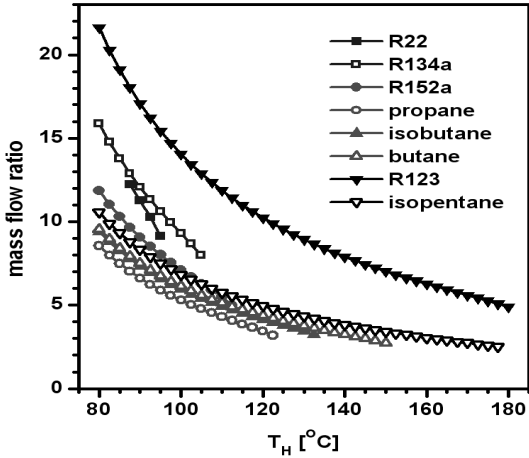


Fig. 5 Plot of mass flow ratio against T_H for various working fluids

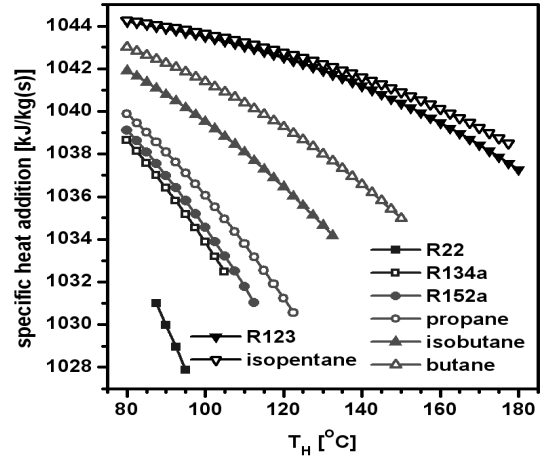


Fig. 7 Plot of heat addition per unit mass of source fluid against T_H for various working fluids

는 엑서지 효율이 최고가 되는 플래쉬 온도 조건에서 플래쉬 증발기에서 포화혼합물 중 증기의 질량 비율, 즉 증기의 분리비는 가열온도에 따라 증가함을 보여준다. 고정된 가열온도에서 분리비는 포화온도가 낮은 물질일수록 높게 나타난다.

Fig. 5에서도 역시 엑서지 효율이 최고가 되는 플래쉬 온도 조건에서 열원유체에 대한 작동유체의 질량유량 비를 보여준다. 질량유량비는 가열온도에 따라 감소하는데 이는 가열온도의 증가에 따라 작동유

체 단위질량당 열유입량이 증가하기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7에서는 엑서지 효율이 최고가 되는 플래쉬 온도 조건에서 작동유체와 열원유체의 단위 질량당 시스템 유입열을 각각 보여준다. 작동유체 단위질량당 유입열은 열원온도에 따라 증가하지만, 열원유체 단위질량당 유입열은 감소한다. 이는 가열온도에 따라 작동유체 단위질량당 유입열이 증가하는 정도보다 열원유체에 대한 작동유체의 질량유량비의 감소 정도가 더 크기 때문이다. 그림에서 고정된 가

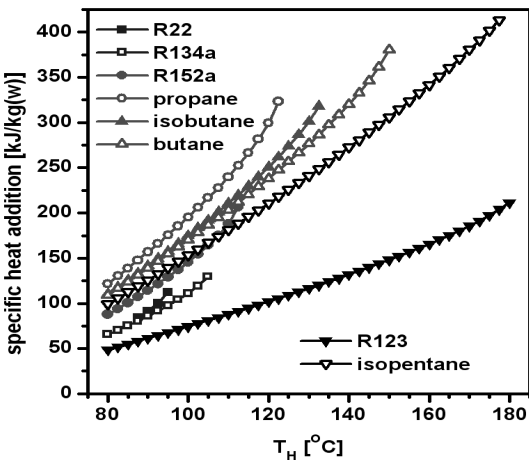


Fig. 6 Plot of heat addition per unit mass of working fluid against T_H for various working fluids

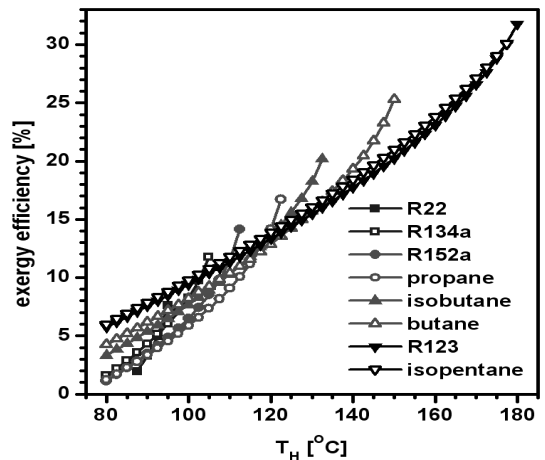


Fig. 8 Plot of exergy efficiency against T_H for various working fluids

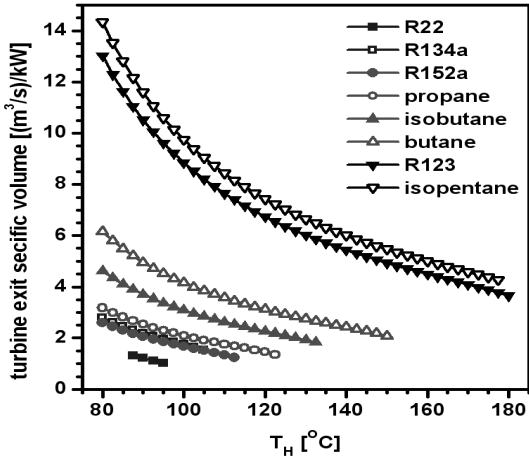


Fig. 9 Plot of flow rate at turbine exit per 1 kW net generation against T_H for various working fluids

열온도에서 물질의 임계온도가 높을수록 열원유체의 단위질량당 유입열도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 엑서지 효율 관점에서 최적의 플래쉬 온도 조건에서 가열온도에 따른 엑서지 효율의 변화를 보여준다. 엑서지 효율은 열원온도에 따라 증가해서 각 물질의 임계온도에서 최고값이 된다. 그림에서 우리는 가열 온도에 따라 엑서지 효율이 최고가 되는 물질이 달라진다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 가열온도가 변화함에 따라 1kW의 순생산일을 생산하기 위해 터빈 출구에서의 체적 유량(m^3/s)의 변화를 보여준다. 이는 가스터빈의 설치 비용과 관련이 될 수 있기 때문에 중요하다. 이는 가열온도가 증가함에 따라 감소하며 또 임계온도가 높은 물질일수록 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 현열 에너지 형태의 저온 열원을 사용하는 유기 플래쉬 사이클(organic flash cycle)의 성능 특성에 대해 해석하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 일정한 가열온도에서 엑서지 효율은 플래쉬 온도에 따라 최고값을 갖는다.

- 2) 엑서지 효율이 최고가 되는 플래쉬 온도는 가열 온도에 따라 증가하여 가열온도가 작동유체의 임계온도가 될 때 최고값을 갖는다.
- 3) 엑서지 효율이 최고가 되는 최적의 플래쉬 온도 조건에서 가열온도의 증가에 따라 작동유체 단위 질량당 시스템 유입열은 증가하지만 열원유체 단위질량당 시스템 유입열은 감소한다.
- 4) 엑서지 효율은 가열온도에 따라 증가하며 최고의 엑서지 효율을 보이는 작동유체는 가열온도에 따라 달라진다.
- 5) 1kW의 순생산일을 생산하기 위해 필요한 터빈 출구에서의 체적 유량(m^3/s)은 가열온도가 증가함에 따라 감소하며 임계온도가 높은 물질일수록 증가한다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. V. A. Prisyazhnik, "Alternative trends in development of thermal power plant", Applied Ther. Eng, Vol. 28, 2008, pp. 190-194.
2. K. H. Kim, C. H. Han, K. Kim, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", Thermochimica Acta, Vol. 530, No. 20, 2012, pp. 7-16.
3. W. Nowak, A. A. Stachel, A. Borsukiewicz -Gozdur, "Possibilities of implementation of a absorption heat pump in realization of the Clausius-Rankine cycle in geothermal power station", Applied Ther. Eng, Vol. 28, 2008, pp. 335-340.
4. T. C. Hung, S. K. Wang, C. H. Kuo, B. S. Pei, K. F. Tsai, "A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources", Energy, Vol. 35, 2010, pp. 1403-

- 1411.
5. A. Delgadotorres, L. Garciarodriguez, "Double cascade organic Rankine cycle for solar-driven reverse osmosis desalination", *Desalination*, Vol. 216, 2007, pp. 306-313.
 6. B. F. Tchanche, G. Papadakis, A. Frangoudakis, "Fluid selection for a low- temperature solar organic Rankine cycle", *Applied Thermal Eng.*, Vol. 29, 2009, pp. 2468-2476.
 7. K. H. Kim, "Study of working fluids on thermodynamic performance of organic Rankine cycle", *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 22, 2011, pp. 223-231.
 8. J. H. Jeong, Y. T. Kang, "Analysis of a refrigeration cycle driven by refrigerant steam turbine", *Int J Refrig.*, Vol. 27, 2004, pp. 33-41.
 9. D. Manolakos, G. Papadakis, E. Mohamed, S. Kyritsis, K. Bouzianas, "Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination", *Desalination* Vol. 183, 2005, pp. 73-80.
 10. D. Manolakos, G. Papadakis, S. Kyritsis, K. Bouzianas, "Experimental evaluation of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination", *Desalination*, Vol. 203, 2007, pp. 366-374.
 11. D. W. Sun, "Solar powered combined ejector-vapour compression cycle for air conditioning and refrigeration", *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, 1997, pp. 479-491.
 12. H. Vidal, S. Colle, "Simulation and economic optimization of a solar assisted combined ejector-vapor compression cycle for cooling applications", *Applied Thermal Eng.*, Vol. 30, 2010, pp. 478-486.
 13. H. Wang, R. Oeterson, T. Herron, "Design study of configurations on system COP for a combined ORC and VCC", *Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 4809-4820.
 14. K. H. Kim, J. Y. Jin, H. J. Ko, "Performance analysis of a vapor compression cycle driven by organic Rankine cycle", *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 23, 2012, pp. 521-529.
 15. T. Ho, S. S. Mao, R. Greif, "Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy", *Energy*, Vol. 42, 2012, pp. 213-223.
 16. T. Ho, S. S. Mao, R. Greif, "Increased power production through enhancements to the Organic Flash Cycle (OFC)", *Energy*, Vol. 45, 2012, pp. 686-695.
 17. T. Yang, G. J. Chen, 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", *Chemical Engineering J.*, Vol. 67, 1997, pp. 27-36.
 18. 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.