

액화 공기 폐열을 사용한 냉방시스템의 에너지 절감 분석 Energy Saving Analysis of Cooling System Using Waste Heat of Liquefied Air

차승윤* · 윤정인** · 설성훈** · 이준혁*** · 최재원* · 손창효**†
Seung-Yun Cha*, Jung-In Yoon**, Sung-Hoon Seol**, Jun-Hyuk Lee***, Jae-Won Choi* and Chang-Hyo Son**†

(Received 21 February 2023, Revision received 12 June 2023, Accepted 14 June 2023)

초록 : 현재 우리나라는 온실가스 감축을 목표로 신재생 에너지의 사용량을 늘리고자 하였으나 안정적인 에너지 공급이 어려워 별도의 저장 시스템이 필요하다. 공기 액화 에너지 저장 시스템은 높은 에너지 밀도와 친환경적이기에 차세대 에너지 저장 시스템으로 부각되고 있다. 액화된 공기의 활용에 관한 연구는 현재 다양하게 진행 중이지만, 터빈을 통해 버려지는 공기를 활용한 연구는 대단히 부족하다. 따라서 본 연구에서는 브라인 칠러만을 사용하는 경우와 터빈의 토출 공기 직접 사용한 경우에 대한 전기 사용량과 에너지 절감률을 시뮬레이션을 통해 서로 비교하였다. 그 결과, 하루 소비 전력량은 3.5 kW를 절감했으며, 이는 14%의 절감효과를 가진다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 자료를 액화 공기 발전을 이용한 기초 냉방 설계 데이터로써 제공하고자 한다.

키워드 : 액화 공기, 발전소, 브라인 칠러, 소비 전력량, 에너지 절감율

Abstract : Korea has tried to increase the use of renewable energy with the aim of reducing greenhouse gases, but the energy storage system is required for renewable energy. The reason for this is that it is difficult to supply stable energy. The liquefied air energy storage system is known as the next generation

**† 손창효(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183
*차승윤(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과
**윤정인(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과
설성훈(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수, 부경대학교 냉동공조공학과
***이준혁(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : 박사과정, 부경대학교 냉동공조공학과
*최재원(<https://orcid.org/0000-0003-4028-4020>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

**† Chang-Hyo Son(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183
*Seung-Yun Cha(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Jung-In Yoon(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Sung-Hoon Seol(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : Assistant Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
***Joon-Hyuk Lee(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : Ph.D. Candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
*Jae-Won Choi(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

energy storage system. Research on the utilization of liquified air is currently underway in various ways, but research using air discharged through turbines are insufficient. The electricity usage and energy savings rate were compared through simulation when using only the brine chiller with using the discharged air of the turbine and the brine chiller. As a result, the daily power consumption was saved by 3.5 kW, which has a 14% saving effect. Finally, this data will be provided as basic cooling design data using liquefied air power generation.

Key Words : Liquified Air, Power Plant, Brine Chiller, Energy Consumption, Energy Saving Ratio

1. 서 론

2015년 12월 채택된 파리협정에서 우리나라는 2030년 37%의 온실가스 감축 목표를 제출하였으며, 2020년 12월 유엔기후변화협약 (UNFCCC)에 제출한 ‘2050 탄소중립 추진전략’에 따라 2018년 대비 2030년 24.4%의 온실가스 감축을 목표로 결정하였다. 따라서 태양광발전, 풍력발전과 같은 신재생 에너지의 사용을 늘리고자 한다.¹⁾

하지만 신재생 에너지는 입지나 기상조건에 따라 출력 변동이 심해 신재생 에너지로부터 안정적인 에너지 공급이 어렵고 전력 생산과 소비의 불균형이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)이 필요하다.²⁾

현재 ESS로 활용되고 있는 리튬이온배터리는 에너지 밀도가 높아 널리 사용되고 있지만, 2018년 5월~2019년 5월 동안 23건의 화재가 발생하여 안전문제가 발생하고 있으며, 수명 또한 5~10년 정도로 짧게 나타난다. 바나듐레독스배터리는 리튬이온배터리에 비해 화재나 폭발의 위험이 적으며, 수명이 길어 출력과 용량을 독립적 조절이 가능하지만 에너지 밀도가 낮으며, 전해액 유출 시 환경오염의 문제가 발생할 수 있다. 이를 대체하기 위한 새로운 ESS로 공기 액화 에너지 저장 시스템(Liquified Air Energy Storage System, LAES System)이 떠오른다. LAES System은 기존의 ESS와 달리 대용량의 에너지를 높은 에너지 밀도로 설치지역의 제약 없이 저장할 수 있으며, 친환경적이라는 장점이 있다.³⁾

공기 액화 에너지 저장 시스템에 관한 종래연구를 살펴보면 다음과 같다. 우선, Jang 등⁴⁾은 2종류의 냉매 (R-600a와 메탄올)를 이용하여 공기 액화 과정의 효율을 향상시키고자 하였다. Park 등⁵⁾은 액화 수소의 냉열을 기체 상태의 공기로 회수하여 액체 상태의 공기로 전환하고자 하였다. Mun 등⁶⁾은 LNG 제기화 과정에서 버려지는 냉열 이용하여 공기를 액화시키고자 하였다. Menezes 등⁷⁾은 공기 랭킨 사이클(ARC)를 사용하여 공기 액화시의 전력 소비를 줄이고자 하였다.

Rajabdorri 등⁸⁾은 액화 공기 에너지 저장에 대한 혼합 정수 선형모델에 관해 연구하였다. Gao 등⁹⁾은 복합 화력 발전소와 액화 공기 에너지 저장 장치를 결합하여 액화 공기 저장 시스템의 효율을 향상시키고자 하였다. Yang 등¹⁰⁾은 태양열 발전과 결합한 액화 공기 저장 시스템을 결합하여 액화 공기 시스템의 왕복효율을 향상시키고자 하였다. Cha¹¹⁾는 터빈에서 토출된 공기를 직접 방으로 토출하여 실내 공조에 사용하고자 하였다. 이처럼 액화 공기를 활용하는 방법에 관한 연구는 다양하게 진행되고 있으나, 터빈을 통해 토출된 공기를 냉방에 활용하는 연구는 대단히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액화 공기 발전소의 터빈 출구에서 버려지는 저온 공기를 실내 냉방에 활용하는 것으로, 냉방 시 저온 공기를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우의 에너지 소비량을 서로 비교하였다. 또한 이 데이터를 액화 공기 발전소 냉방 설계의 기초 자료로 제공하고 자 한다.

2. 시뮬레이션 조건 및 모델식

2.1 시뮬레이션 해석 조건

냉방은 오전 9시부터 오후 6시까지 진행한다고 가정하였다. 그 중 오전 9시부터 오후 12시까지만 발전기가 작동한다. 이때 터빈에서 토출된 공기를 브라인 냉각에 사용하며, 오후 12시부터 오후 6시까지는 발전기가 작동하지 않아 칠러를 직접 사용하여 브라인을 냉각하였다. 터빈에서 토출된 공기와 브라인 칠러를 이용할 때와 브라인 칠러만을 사용할 때를 시뮬레이션하여 비교하였다. 시뮬레이션은 Aspen Tech사의 Aspen HYSYS¹²⁾를 사용하여 진행하였다. 냉방 능력 분석을 위한 모델의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 개략도를 HYSYS 프로그램에 모사한 것이다. 브라인 칠러는 1단사이클로 구현하였으며, 실내기는 공기와 브라인이 열교환하는 열교환기로 구현하였다. 칠러의 작동 냉매는 현재 냉난방에 주로 사용되는 R-410a를 적용하였다.

또한 Table 1에 나타낸 것과 같이, 실내 부하는 3 RT라 가정하였으며, 터빈의 토출 유량은 국내 공기액화 플랜트의 작동 시간인 3시간 동안 45 ton으로 1시간 동안 15 ton/h의 유량을 가진다고 설정하였다. 터빈 토출 공기 온도는 10°C로 설정하였다. 실내의 온도는 공공기관의 실내 유지온도인 26°C로 설정하였다. 열교환기의 LMTD는 열교환 설계에서 흔히 사용되는 5°C로 설정하였다.

외기온도는 현재 국내 공기액화 플랜트 건설예정지인 진주시의 2022년도의 가장 온도가 높았던 8월 6일을 기준으로 선정하였다. 2022년 8월 6일의 시간에 따른 외기온도는 Fig. 3에 나타내었다.

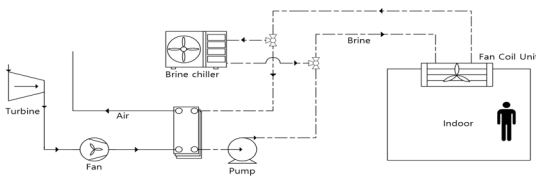


Fig. 1 Schematic of cooling system using low temperature air

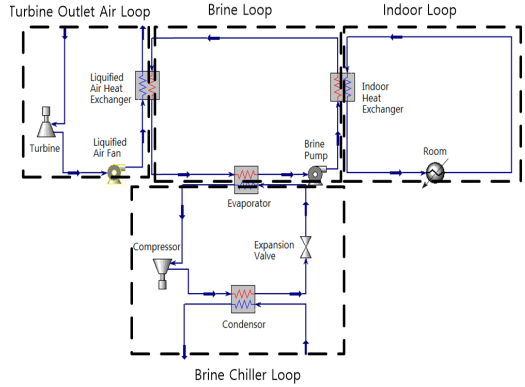


Fig. 2 Process of cooling system using low temperature air

Table 1 Simulation condition

Parameter	Value	Unit
Heat load	3	RT
Turbine outlet temperature	10	°C
Indoor air temperature	26	°C
Heat exchanger LMTD	5	°C

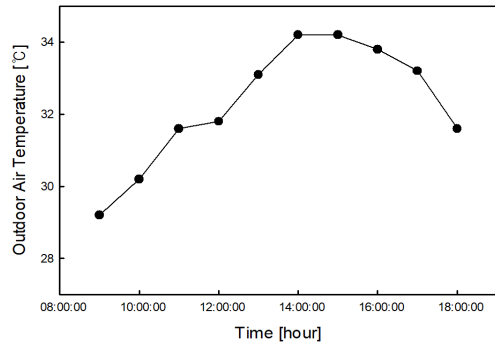


Fig. 3 Outdoor air temperature according to time

3. 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 유량 변화

실외기와 실내기의 소비 전력량은 시뮬레이션으로 얻은 유량을 삼성에서 판매 중인 제품에 사용된 송풍기를 참조하여 계산하였다. 또한 브라인 펌프의 소비 전력량은 Willo사의 펌프 선정 프로그램

램을 참조하였다. 시간과 브라인 냉각 방식에 따른 실내기, 실외기, 브라인 펌프의 유량을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4는 터빈에서 토출된 공기만을 사용할 때의 유량에 대한 비교이며, 이 동안은 브라인 칠러가 작동하지 않는다. 터빈이 작동할 경우 토출 공기 유량은 발전기의 작동 시간인 3시간 동안 45 ton이라는 정해진 양의 공기를 사용하므로 유량이 일정하게 나타난다.

실내 공기 공급 온도와 목표 실내 유지 온도가 일정하여 실내기의 입출구 온도가 일정한 것으로 볼 수 있으며, 실내 부하가 3 RT로 유지되기 때문에 유량이 일정해진 것으로 판단된다. 브라인의 부하 또한 일정하며 브라인의 온도 변화 또한 없기에 유량이 일정한 것으로 판단된다.

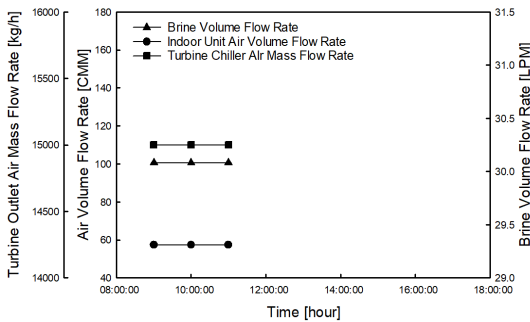


Fig. 4 Mass and volume flow rate of cooling system according to time using the air of turbine outlet (Brine chiller not used)

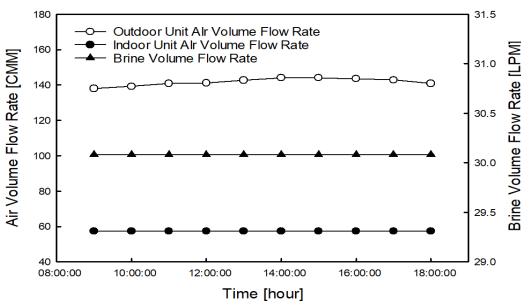


Fig. 5 Volume flow rate of cooling system according to time using brine chiller (Brine chiller used)

Fig. 5는 터빈의 출구 공기 없이 브라인 칠러만을 이용하여 냉방하는 방식이다. 터빈이 작동하지 않아 브라인 칠러를 사용하여 브라인을 냉각할 경우 브라인 칠러의 실외기에서는 외기온도에 따른 공기 유량의 변화가 나타난다. 브라인 칠러를 사용한 냉각 시 외기온도에 따라 응축압력이 변화하여 실외기 공기 유량의 변화가 나타난 것으로 판단된다.

3.2 시간에 따른 소비 전력량 변화

3.2.1 시간에 따른 압축기 소비 전력

시뮬레이션으로 얻은 유량을 토대로 소비 전력량을 구한 실내기, 실외기, 펌프와는 달리 브라인 칠러 사용 시 작동하는 압축기는 시뮬레이션을 통하여 이론상의 소비 전력량을 얻을 수 있었기에 시뮬레이션을 통해 얻은 값을 사용하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 압축기의 소비 전력량은 Fig. 6에 나타내었다.

외기온도가 가장 높은 시각인 오후 14~15시에 1.91 kW로 가장 높은 소비 전력량이 나타났으며, 가장 낮은 오전 9시에 1.54 kW로 가장 낮게 나타났다. 이는 외기온도가 높아질수록 응축온도 또한 높아져 압축기의 소비 전력이 커진 것으로 판단된다.

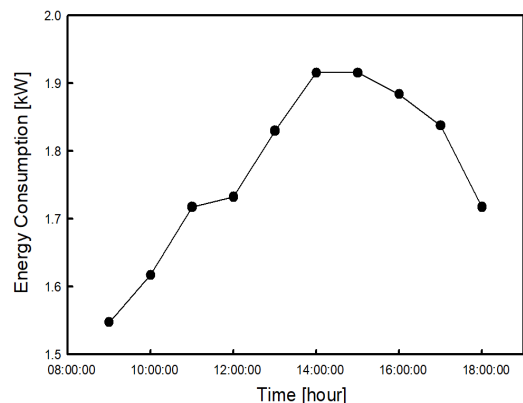


Fig. 6 Compressor energy consumption of cooling system according to time (Brine chiller used)

3.2.2 시간에 따른 총소비 전력 변화

카탈로그를 참조하여 계산한 실내기, 실외기, 펌프의 소비 전력량과 브라인 칠러 사용 냉방 시의 시뮬레이션을 통해 구한 이론상의 압축기 소비 전력을 토대로 터빈의 토출 공기를 사용한 냉각과 브라인 칠러를 사용한 냉각 사이의 소비 전력량을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

터빈의 토출 공기를 사용한 냉각 시의 소비 전기량은 터빈이 작동하는 3시간 동안 1.05 kW로 일정하게 나타나는데, 이는 공조를 위해 사용되고 있는 장치들의 유량이 일정하여 소비 전력량의 변화가 일정하게 나타난 것으로 판단된다. 반면, 브라인 칠러를 사용한 냉각 시의 소비 전력량은 외기온도가 가장 높은 오후 14~15시에 2.57 kW로 가장 높게 나타났으며, 외기온도가 가장 낮은 오전 9시에는 2.14 kW로 가장 낮은 소비 전력량이 나타나게 되었다. 이는 실외기의 공기 유량이 외기온도의 영향을 받으며 압축기의 소비 전력량 또한 외기온도에 영향을 받아 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

하루 동안 사용한 총 에너지의 양은 Fig. 7을 토대로 브라인 칠러만을 사용하여 냉방 할 때와 터빈의 공기 사용 후 칠러를 이용하여 냉방 할 경우의 하루 동안 전기소모량을 계산하여 Fig. 8과 같이 나타낸다. 브라인 칠러만을 사용하여 브라인을 냉각할 경우, 24.17 kW의 소비 전력량이 나타났으며, 발전기가 작동되어 터빈으로부터 저온 공

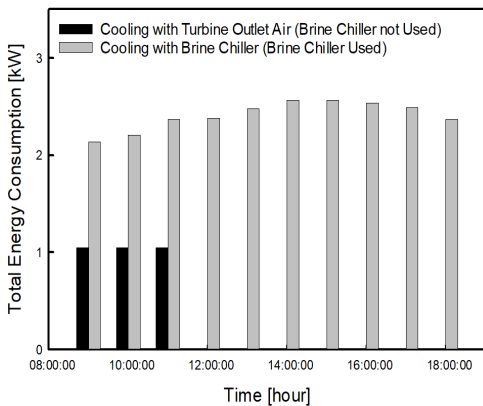


Fig. 7 Total energy consumption of cooling system for two modes according to time

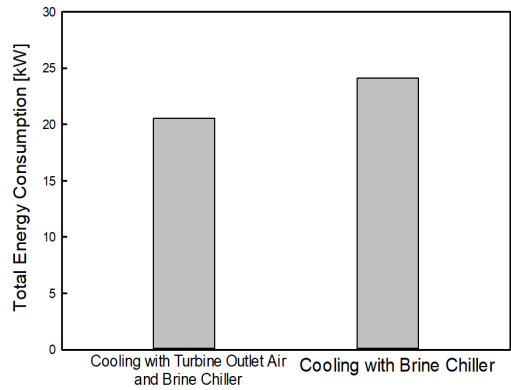


Fig. 8 Total energy consumption of cooling system during day for two cooling modes

기가 토출되는 시간인 오전 9시에서 오후 12시 동안은 터빈에서 토출된 공기로 냉각하며, 나머지 오후 1시에서 오후 6시 동안은 브라인 칠러를 사용하여 브라인을 냉각할 경우, 소비 전력량은 20.6 kW로 나타났다.

3.3 시간에 따른 에너지 절감률

앞선 3.2에서의 결과와 같이 터빈에서 토출된 공기로 냉각 시 브라인을 사용한 냉각보다 더 적은 전력이 소비된다. 정확한 절감량의 분석을 위하여 발전기가 작동하여 터빈에서 공기가 토출되는 오전 9시부터 오후 12시까지 에너지 절감율을 계산하여 Fig. 9에 나타내었다.

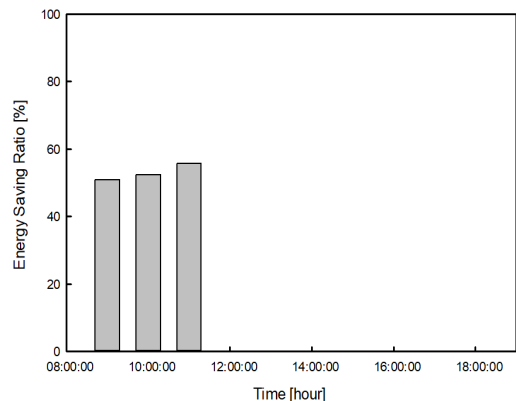


Fig. 9 Energy saving ratio of cooling system according to time

계산 결과, 오전 9시에 에너지 절감률이 50.7%로 가장 적은 절감률을 나타내었으며, 오후 12시에 55.6%로 가장 많은 절감률이 나타내었다. 또한, Fig. 8을 토대로 1일 동안의 소비 전력을 비교한 결과, 터빈 토출 공기를 사용할 시 14%의 소비 전력을 절감할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 액화 공기 발전 이후 버려지는 터빈의 공기를 브라인 냉각에 활용함으로써 발생한 에너지 절감률에 관해 연구하였다. 연구에 관한 결과는 다음과 같다.

1) 터빈의 토출 공기를 활용한 냉각 시 실내기, 터빈 토출 공기, 브라인의 유량이 일정했다. 반면, 브라인 칠러를 활용한 냉각 시 실내기와 브라인의 유량은 일정했지만, 실외기의 유량은 외기온도에 따라 변화했다.

2) 터빈의 토출 공기를 활용한 냉각 시 소비 전력량은 일정하게 나타났지만, 브라인 칠러를 활용한 냉각 시 최대 2.57 kW, 최소 2.14 kW로 외기온도에 따라 다양하게 나타났다.

3) 터빈 토출 공기 사용 시 시간별로 본다면 50~55%의 절감효과를 얻었으며, 하루로 본다면 14%의 절감효과를 가진다.

위 결과에 따라 외기온도가 높을수록 총소비 전력은 늘어났으며, 터빈 공기 사용 시의 전기소모량은 일정하기에 외기온도가 높은 시간에 터빈 공기 사용 시 절감효과 또한 늘어났다. 따라서 발전 시간의 변경 또는 공기 저장 후 외기온도가 가장 높은 시간에 사용하면 약 18% 정도의 절감효과를 가질 수 있다. 본 논문은 액화 공기 발전에 활용한 냉방시스템의 기초 설계 자료로서 활용될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021-2023년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. Y. Cha; Conceptualization. J. I. Yoon; Data curation. S. H. Seol; Formal analysis; J. H. Lee; Investigation. J. W. Choi; Software. C. H. Son; Supervision.

References

1. S. J. Park, 2021, "Air Liquefied Energy Storage System is in line with the international trend of carbon neutrality", gas news.
2. A. R. Ko et al., 2020, "Economic Evaluation of Liquid Air Energy Storage (LAES) System", *New & Renewable Energy*, 16(1), 1-14.
3. S. J. Park, 2021, "Final Report on the Development of Energy Storage and Utilization System Technology through Renewable Energy-Linked Air Liquefaction", daejeon: Korea Institute of Machinery&Materials.
4. S. N. Jang and J. P. Park, 2018, "Simulation Study on Liquid Air Energy Storage (LAES) System using Dual Refrigeration Cycles and Thermal Oil Circulation", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 22(4), 63-73. (<https://doi.org/10.7842/kigas.2018.22.4.63>)
5. S. H. Park et al., 2019, "Performance Evaluation and Optimization of Hydrogen Liquefaction Process Using the Liquid Air for Pre-Cooling", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 30(6), 490-498. (<https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.490>)
6. H. N. Mun, J. G. Ho and I. K. Lee, 2021, "Design and Economic Analysis of Low Pressure Liquid Air Production Process using LNG cold energy", *Korean chemical engineering research*, 59(3), 345-358. (<https://doi.org/10.9713/kcer.2021.59.3.345>)
7. M. V. P. Menezes, I. F. Vilasboas and J. A. M. Silva, 2022, "Liquid Air Energy Storage System (LAES) Assisted by Cryogenic Air

- Rankine Cycle (ARC)", *Energies*, 15(8), 1-16. (<https://doi.org/10.3390/en15082730>)
8. M. Rajabdorri, L. Sigrist and E. Lobato, 2022, "Liquid Air Energy Storage Model for Scheduling Purposes in Island Power Systems", *energies*, 15(19), 1-13. (<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15196958>)
 9. Z. Gao et al., 2021, "Thermo-economic analysis of the integrated bidirectional peak shaving system consisted by liquid air energy storage and combined cycle power plan", *Energy conversion and management*, 234, 1-13. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113945>)
 10. M. Yang et al., 2022, "Study on design optimization of new liquified air energy storage (LAES) system coupled with solar energy", *Journal of Energy Storage*, 51, 1-18. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104365>)
 11. S. Y. Cha, 2022, "Energy Saving Analysis of Cooling System Using Waste Heat of Liquified Air Power Plant", Pukyong National University Graduate School.
 12. Aspen HYSYS. Version 12.1, 2022, Aspen Technology Inc.
 13. D. Y. Peng and D. B. Robinson, 1976, "A New Two-Constant Equation of State", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15, 59-64.