

## LNG 냉열을 이용한 공기액화분리시스템의 시뮬레이션 및 공정 해석

한단비 · 백영순<sup>†</sup>

수원대학교 환경에너지공학과

### Process Analysis and Simulation for System of Air Liquefaction Separation Using LNG Cold Energy

DANBEE HAN, YOUNGSOON BAEK<sup>†</sup>

Department of Environment and Energy Engineering, The University of Suwon, 17 Wowan-gil, Bongdam-eup, Hwaseng 18323, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
ysbaek@suwon.ac.kr

Received 30 May, 2019

Revised 17 June, 2019

Accepted 30 June, 2019

**Abstract >>** The process of separating oxygen and nitrogen from the air is mainly performed by electric liquefaction, which consumes a lot of electricity, resulting in higher operating costs. On the other hand, when used for cold energy of LNG, electric power can be reduced compared to the electric Linde cycle. Currently, LNG cold energy is used in the cold refrigeration warehouse, separation of air-liquefaction, and LNG cold energy generation in Japan. In this study, the system using LNG cold energy and the Linde cycle process system were simulated by PRO/II simulators, respectively, to cool the elevated air temperature from the compressor to about  $-183^{\circ}\text{C}$  in the air liquefaction separation process. The required amount of electricity was compared with the latent heat utilization fraction of LNG, the LNG supply pressure, and the LNG cold energy usage. At the air flow rate of  $17,600\text{ m}^3/\text{h}$ , the power source unit of the Linde cycle system was  $0.77\text{ kWh}/\text{m}^3$ , compared with  $0.3\text{ kWh}/\text{m}^3$ .

**Key words :** LNG(액화천연가스), Cold energy(냉열에너지), Air liquefaction(공기 액화), Air separation(공기분리), Process simulation(공정시뮬레이션)

## 1. 서론

액화천연가스(LNG)는 천연가스를  $-162^{\circ}\text{C}$ 로 냉각시킨 것으로 무독성, 무취, 무색의 가스이며 안전하고 비부식성으로 청정한 에너지원이다. LNG는 연소 단계에서 이산화황 배출 및 질산화물 배출량이 거의 없는 장점을 가지므로, 차량이나 운송용 연료로 사용

된다. LNG는 기화과정을 거쳐 가스 공급망에 공급되는데 이때, LNG 증발기의 상변화 과정에서 냉열 에너지를 얻을 수 있다. 냉열에너지는 초저온이 필요한 액화-분리공정, 담수화 공정, 냉장창고 시스템,  $\text{CO}_2$  포집기술 등에 이용될 수 있다<sup>1-4)</sup>. 냉열에너지로 대체하여 이용할 때 전력저감뿐만 아니라 이산화탄소 배출량 감축이 가능할 것으로 예상된다. Jiang<sup>5)</sup>에

**Table 1.** The status of air liquefaction separation process using LNG cold energy<sup>8)</sup>

Item	Tokyo Liquid Oxygen	Oxy Fos	Tokyo Liquid Nitrogen	Cold Air Products	Central Liquid Oxygen
Air amount	26,000	-	17,000	22,000	23,200
Capacity	L-O <sub>2</sub> 7,000 L-N <sub>2</sub> 3,050 L-Ar 150	L-O <sub>2</sub> 3,500 L-N <sub>2</sub> 4,000 L-Ar 150	L-O <sub>2</sub> 6,000 L-N <sub>2</sub> 6,000 L-Ar 100	L-O <sub>2</sub> 7,500 L-N <sub>2</sub> 7,500 L-Ar 150	L-O <sub>2</sub> 6,000 L-N <sub>2</sub> 4,000 L-Ar 100
Purity	L-O <sub>2</sub> 99.8% L-N <sub>2</sub> 99.999% L-Ar 99.999%	L-O <sub>2</sub> 99.8% L-N <sub>2</sub> 99.999% L-Ar 99%	L-O <sub>2</sub> 99.8% L-N <sub>2</sub> 99.999% L-Ar 96%≤	L-O <sub>2</sub> 99.8% L-N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1ppm≥ L-Ar O <sub>2</sub> 1ppm≥	L-O <sub>2</sub> 99.6% L-N <sub>2</sub> 99.999% L-Ar 99.999%
LNG flow rate	8 t/hr	180 t/hr	34 t/hr	23 t/hr	26 t/hr

의하면 중국에서 냉열에너지를 이용함으로써 석탄이 235.6백만 톤이 절약되고 6.13톤의 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄일 것으로 예측하였다.

공기는 다양한 물질이 섞인 가스로 대기압의 공기는 78% 질소, 21% 산소, 0.934% 아르곤, 0.0376% 기타 가스로 이루어져 있으며, 액체 산소 및 질소를 공기 액화-분리공정을 통해 얻을 수 있다<sup>6)</sup>. 액체산소와 액체질소는 다양한 산업에 원료로 사용되며, 병원에서 환자들의 산소공급이나 초저온수술과 같은 의료행위에도 사용되고 있다.

공기액화공정 중에서 공기를 냉각시키는 공정은 높은 운전비용을 초래하기 때문에 LNG 냉열을 이용하면, 많은 전기 에너지를 절감할 수 있다<sup>7)</sup>. 1971년부터 일본의 도쿄액화산소에서 LNG 냉열을 이용한 공기분리장치가 운전개시되었으며, 그 이후로 프랑스의 Oxy Fos와 Cold Air Products, 도쿄산소·질소, 중부액화산소 등이 차례대로 LNG 냉열을 이용하는 공기액화 분리공정운전을 개시하였다. 일본에서는 산소, 질소의 연간생산량은 Table 1과 같이 사용되고 있다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 공기액화 분리공정에서 압축기로부터 상승된 공기온도를 약 -176°C까지 냉각시키기 위하여 Linde cycle 공정을 전기식과 LNG 냉열 이용방식을 PRO/II 시뮬레이터에 의해 각각 공정에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 특히 LNG 냉열을 이용하는 경우에 LNG 잠열이용 분율, LNG의 공급압력, LNG 냉열이용량에 따른 요구되는 전력량을 구하였으며, 공기량 17,600 m<sup>3</sup>/hr에서 LO<sub>2</sub>/LN<sub>2</sub>의 생산

량 비율(0.5-2.0) 변화에 따른 전력 원단위(kWh/m<sup>3</sup>)를 비교 분석하였다.

## 2. 공기 액화분리 공정

### 2.1 공기 액화분리 공정 원리

공기 액화분리 공정의 하나인 Linde cycle은 Figs. 1, 2에서 보는 것 같이 공기가 2→3으로 등온 압축되고, 열교환기에서 3→4로 냉각되며, 팽창 밸브에 의해 일정한 압력까지 팽창되어 4→5로 이동한다. 4→5에서 공기는 Joule-Thomson 효과에 의해 비엔탈피로 변화한다. 5에서 습증기(기액 혼합) 상태이므로 포화도 6과 포화증기 7로 나뉜다. 포화증기 7은 저온이므로 열교환기를 통해서 압축공기를 3→4로 냉각시키고 포화증기는 8로 이동한다. 새로운 공기 1과 혼합되어 2로 이동하고 압축되는 흐름이 반복되면서 액화되는 원리이다<sup>9)</sup>.

복식 증류탑에는 기액혼합 상태로 공급되고, 증류탑에서 높은 비점을 가진 성분인 산소는 탑저로 이동하여 산소의 농도가 높아진다. 한편 비점이 낮은 질소는 가스가 상승하여 증류탑의 상부로 이동하고, 질소의 농도가 높아진다. 증류된 고순도 질소는 액체 산소의 냉열에 의해 액화된다. 질소는 가압하여 액화 온도를 상승시키고 증류탑 상부에 존재하는 액체 산소 온도보다 높아짐에 따라 액화에 필요한 냉열을 얻을 수 있다.

### 2.2 공기 액화분리 공정의 시뮬레이션

상기 공기 액화분리 공정으로부터 Fig. 3과 같은 시뮬레이션을 위해서 모델링을 수행하였다. 상온 공기 17,600 m<sup>3</sup>/hr가 C1(압축기)로 들어가서 16 bar로 승압하면 공기는 약 370°C가 되기 때문에 E1 (Cooler1)에서의 열교환으로 25°C 공기로 냉각시킨다. E2 (Cooler2)로 들어가서 회수되는 저온 N<sub>2</sub>와 열교환하여 공기가 예냉되며, E3 (liquefier)에서의 상압 이상에서 액화 가능한 -176°C까지 냉각되는 공정이다. 이렇게 액화된 -176°C의 공기는 팽창밸브를 통해 압력

을 약 1 bar까지 낮추게 되면 액체공기는 증류탑 컬럼에서 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>를 분리하여 기화한 N<sub>2</sub>는 상단으로 나가 냉각기 E2에서 저온측 gas와 열교환이 되고 대기로 배출되며, 액체산소는 탑 하부로 생산되는 공정으로 시뮬레이션을 하였다. 전기식 Linde cycle 공정에서 E1과 E3의 냉각기는 air-cooler를 사용하였으며, LNG 공정에서는 LNG 냉열로 대체하여 사용하였다. E1과 E3에 들어가는 저온측 LNG 냉열은 -163°C, 64 bar로 공급되며, LNG 잠열을 최대한 활용하기 위해 전체 기화되어 나오도록 LNG 냉열량을 조절하였다. 전기식 Linde cycle과 LNG 냉열식의 공기액화시스템의 시뮬레이션을 위해 사용된 물질수지는 Table 2에 나타났다.

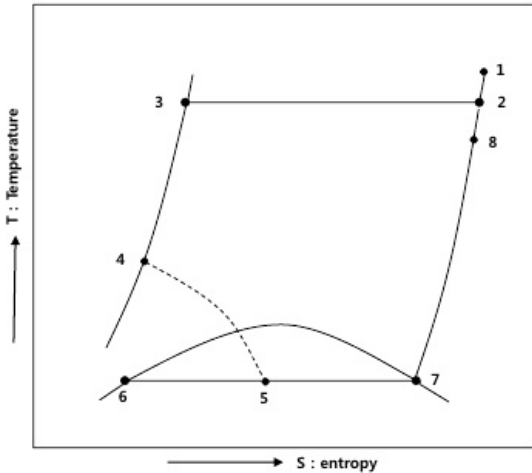


Fig. 1. Refrigeration cycle for Linde process

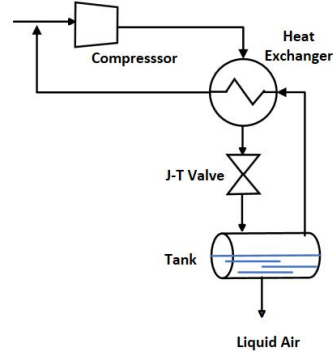


Fig. 2. Air liquefaction separation process for Linde cycle

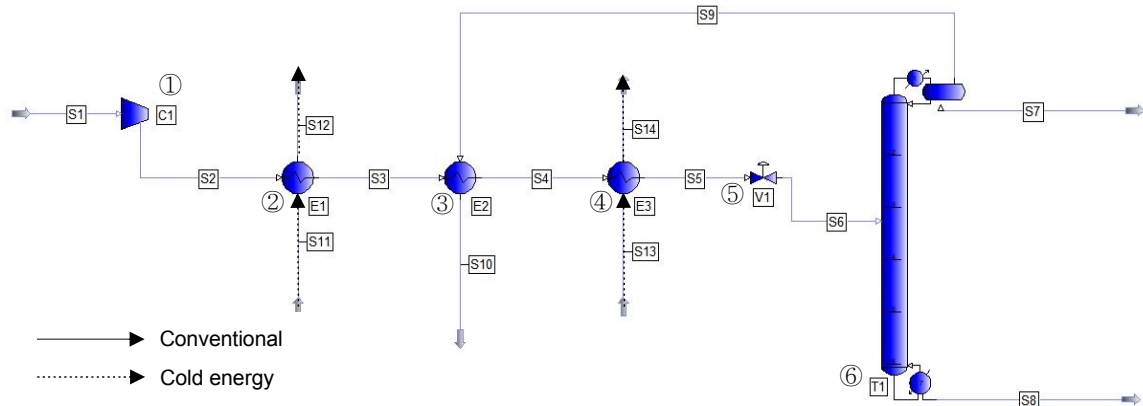


Fig. 3. The simulation model for air liquefaction separation process

### 3. 시뮬레이션 결과

#### 3.1 공기 액화분리 공정에서의 에너지 소요량

상기 두 공정을 시뮬레이션 하여 주요 장치에서 소요되는 에너지의 양을 구하여 Table 3에 나타냈다. T1에서의 소요전력은 Xiong과 Hua<sup>10)</sup> 논문을 인용하여 300 kW로 계상하였다. C1, E2와 T1에서 소요되는 동력은 동일하게 하였으며, E1과 E2 장치에서 사용된 전기를 LNG 냉열로 대체 활용하였을 때, 소요 동력이 약 3,653 kW 절감되었다.

**Table 2.** Air liquefaction separation system for Linde cycle and using LNG cold energy

Stream	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	17,596	17,596	17,596	17,596	17,596	17,596	2,701
Temp. (°C)	25	337	25	-120	-183	-194	-196
Press. (bar)	1	16	16	16	16	1	1
Stream	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	5,166	2,790	2,790	12,182	12,182	8,221	8,221
Temp. (°C)	-97	-194	-20	-163	-35	-163	-5
Press. (bar)	1	1	1	64	64	64	64

S11-S14: LNG cold energy system.

**Table 3.** Required energy of main equipments for process

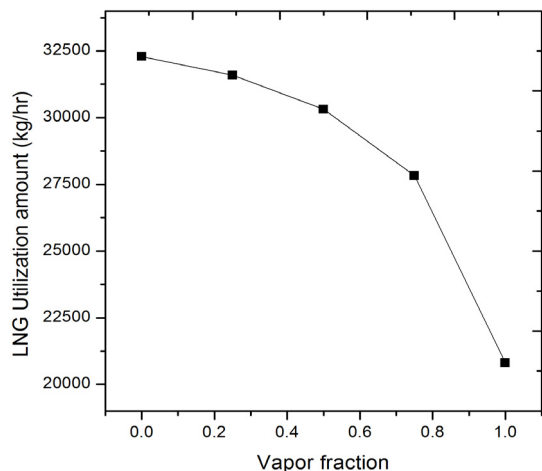
Unit	Conventional	LNG cold energy
C1	2,073 W	
E1	Air-cooler	Cold energy HX
	2,093 kW	1,802 Mcal/hr (2,093 kW)
E2	56 Mcal/hr (650 kW)	
E3	Air-cooler	Cold energy HX
	1,562 kW	1.345 Mcal/hr (1,562 kW)
T1 <sup>10)</sup>	300 kW	
	6,027 kW	2,373 kW

#### 3.2 LNG 잠열이용률에 따른 냉열에너지량

LNG 냉열에너지는 온도의 변화로부터 얻는 현열 에너지(80 kcal/hr)와 기화되면서 얻을 수 있는 잠열 에너지(110 kcal/hr)가 있다. 공기 액화분리 공정에서 LNG가 임계압력 이하인 64 bar로 공급될 때, LNG의 잠열에너지 이용률에 따른 E1의 LNG 냉열량 변화에 대해 분석하였다. 잠열이용률은 기화되면서 잠열이 발생하기 때문에 기화되는 양에 따라 달라지므로, LNG 냉열을 이용한 E1와 E3에서 필요로 하는 LNG 유량을 계산하여 Fig. 4에 나타냈다. Vapor fraction이 0일 때는 LNG가 현열만 이용하는 조건이며, vapor fraction이 1일 때는 100% 기화되는 조건이다. 기화되는 양이 많을수록 사용되는 LNG 양이 감소하는데, 이는 잠열이용률이 증가하기 때문이다<sup>11)</sup>.

#### 3.3 LNG 공급압력에 따른 냉열에너지량

LNG는 인수기지에서 배관을 통해 공급될 때 70 bar로 공급되고, 탱크로부터 공급될 때 10-20 bar로 공급되는 상황이다. LNG의 압력과 온도에 따른 냉열의 잠열량을 Fig. 5에 나타냈다. 압력이 10-70 bar에서 LNG가 100% 기화(-35°C의 NG)된 상태라는 조건에서 시뮬레이션을 하였으며, LNG 공급압력에 따



**Fig. 4.** Required LNG amount for E1 with vapor fraction

른 E1과 E3에서 소요되는 LNG 양을 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 10 bar에서는 약 17 ton, 70 bar에서 약 22 ton이 소요되기 때문에 압력이 높을수록 열교환에 필요한 LNG 양이 많아진다. 즉 저압에서의 LNG 냉열이용량이 고압에 비해 더 많은 것은 저압에서의 잠열이 고압에 비해 크기 때문이다<sup>10)</sup>.

### 3.4 LNG 공급량에 따른 소요전력량

LNG 냉열을 이용하는 시스템은 70 bar에서 LNG

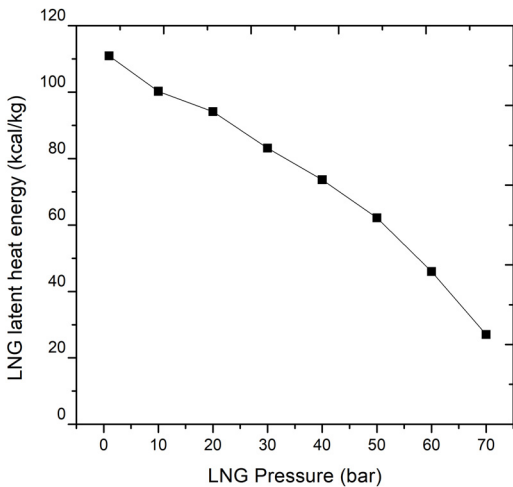


Fig. 5. LNG latent heat with LNG supply pressure

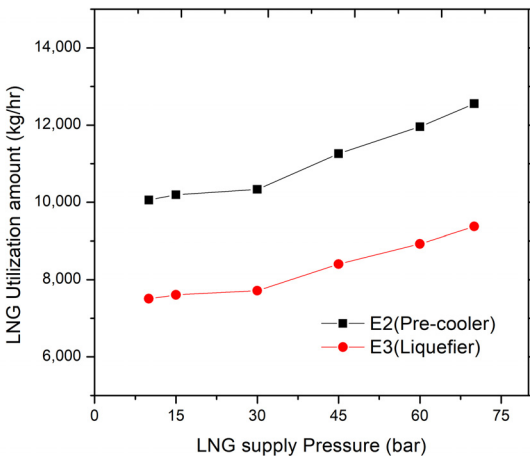


Fig. 6. Required LNG amount for E1 and E3 with LNG supply press.

공급량의 여건에 따라 전기식과의 소요전력량을 비교분석하여 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 전기식의 경우(LNG유량 0 kg/hr) 소요전력량은 6,027 kW/h, 냉열을 50% 이용하였을 때 4,091 kW/h, LNG 냉열 최대치 21 ton/hr를 이용하였을 때 2,373 kW/h 소요된다. 따라서 LNG 양이 증가할수록 이용 가능한 냉열량이 많아지므로 소요되는 E1에서의 동력이 더 많이 감소하게 되며, 전기식 시스템과의 절감량이 더 많이 증가하게 된다.

### 3.5 LNG 냉열시스템의 전력 원단위

LNG 냉열을 이용하여 100% 잠열이용 조건에서의 공기 17,600 m<sup>3</sup>/hr를 64 bar 하에서 LO<sub>2</sub>/LN<sub>2</sub> 비율 변화에 따른 전력 원단위를 전기식과 비교하여

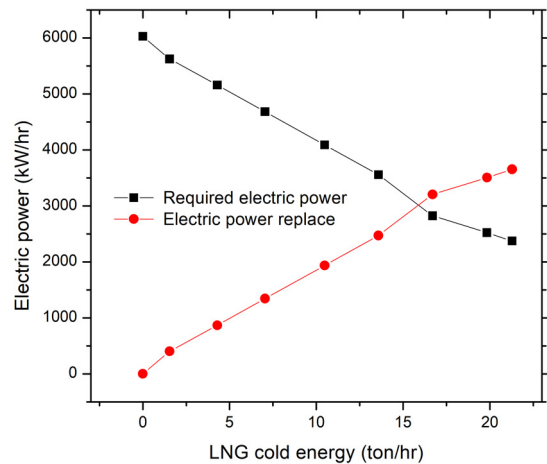


Fig. 7. The amount of replaced electric power with LNG cold energy

Table 4. Power unit price (kWh/m<sup>3</sup>) for air liquefaction separation process using LNG cold energy

LO <sub>2</sub> /LN <sub>2</sub>	LO <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /h)	LN <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Power unit price (kwh/m <sup>3</sup> )	
			Conventional	LNG
0.5	2,699	5,443	0.74	0.29
1	3,995	4,026	0.75	0.30
1.5	4,727	3,202	0.76	0.30
2	5,166	2,701	0.77	0.30

Table 4에 나타냈다.  $LO_2/LN_2$  비율이 증가함에 따라서 전력 원단위는 약간 증가하는 경향이 있다. 이는 액체산소 생산량이 증가하면서 액체질소량이 감소하여 전체 액체산소와 질소의 생산량이 감소하기 때문이다. 또한, 전기식 시스템의 전력 원단위는 약 0.74-0.77 kWh/m<sup>3</sup>에 비해 냉열시스템은 0.29-0.30으로 나타나 전기식에 비해 냉열시스템이 우수하다.

#### 4. 결론

공기 17,600 m<sup>3</sup>/hr을 Linde cycle 전기식 시스템과 LNG 냉열식 공기 액화분리 공정으로부터 액체산소와 액체질소를 분리하는 시뮬레이션한 수행 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전기식 시스템의 경우 6,027 kW/hr의 전력이 소요되며, LNG 냉열식 시스템의 경우 E1과 E2 냉각기의 소요 전력을 LNG 냉열로 대체 활용하므로써 약 2,373 kW/hr 전력을 절감할 수 있기 때문에 전기식에 비해 약 60%의 전력저감 효과를 얻을 수 있다.

2) LNG 냉열식 시스템은 LNG 기화되는 양에 따라 이용하는 LNG 냉열에너지가 달라지며, LNG 잠열이용률이 높아질수록 LNG 냉열에너지량이 증가하기 때문에 소요되는 LNG 양은 감소한다.

3) 저압에서의 LNG 잠열에너지량이 고압에서보다 크기 때문에 사용되는 LNG 공급압력이 증가할수록 소요되는 LNG 양은 증가한다.

4) 공기 액화분리 공정에서 사용되는 LNG 냉열량이 최대 22 ton으로 많이 사용하면 냉각기의 E1과 E3에서 소요전력이 최대 3,654 kW/hr까지 저감된다.

5) 생산되는  $LO_2/LN_2$  비율이 증가함에 따라 전체 생산량이 감소하여 전력 원단위는 높아지고, LNG 냉열식의 경우 0.29-0.30 kWh/m<sup>3</sup>로서 전기식 0.74-0.77 kWh/m<sup>3</sup>에 비해 2.5배 적게 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 에너지기술개발사업 실증형 과제(2001820110106370)일환으로 수행되었다.

#### References

1. B. B. Kanbur, L. Xiang, S. Dubey, F. H. Choo, and F. Duan, "Cold utilization system of LNG: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, 2017, pp. 1171-1188, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.161>.
2. A. Messineo and D. Panno, "Potential applications using LNG cold energy in Sicily", *International Journal of Energy Res*, Vol. 32, No. 11, 2008, pp. 1058-1064, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1411>.
3. S. Hirakawa and K. Kosugi, "Utilization of LNG cold: Utilisation du froid du GNL", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 4, No. 1, 1981, pp. 17-21, doi: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(81\)90076-1](https://doi.org/10.1016/0140-7007(81)90076-1).
4. N. Zhang and N. Lior, "Novel near-zero CO<sub>2</sub> emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization", *Energy*, Vol. 31, No. 10-11, 2006, pp. 1666-1679, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.006>.
5. K. Jiang, "Economic analysis of LNG cold energy utilization", Springer, Switzerland, 2017, pp. 119-132, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26950-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26950-4_5).
6. M. Kundu, "Simulation of air liquefaction using aspen plus", National Institute of Technology Rourkela, India, 2012. Retrieved from [thesis.nitrkl.ac.in/3235/](https://thesis.nitrkl.ac.in/3235/).
7. M. Mehrpooya, M. Sharifzadeh, and M. Chahartaghi, "Investigation of novel Intergrated air separation processes, cold exergy recovery of liquefied natural gas and carbon dioxide power cycle", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113, 2016, pp. 411-425, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.058>.
8. "A study on the power generation technology utilizing LNG cold energy", Report, KOPEC R&D Institute, Korea, 1985, pp. 941-956.
9. R. F. Barron, "Cryogenic system", Oxford University Press, New York, 1985.
10. Y. Q. Xiong and B. Hua, "Simulation and analysis of the air separation process by using cold energy", *China Academic Journal Electric Publishing House*, Vol. 25, No. 3, 2007, pp. 68-76. Retrieved from <http://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?docid=10005811-200706-25-3-68-72-a>.
11. D. Han, Y. Kim, K. Yeom, J. Shin, and Y. Baek, "A study of simulation on the Refrigerated warehouse system based on the cold energy of LNG using the PRO-II simulator", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, 2017, pp. 401-406, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4.401>.