

## ANALISIS TEKNO EKONOMIS REGASIFIKASI LNG DAN *ORGANIC RANKINE CYCLE* UNTUK *COLD STORAGE*

Isna Zahrotul Husna<sup>1)</sup>, Nita Wahyuni Dwi Puspitasari<sup>2)</sup>, Nofema Tria Liska<sup>3)</sup>, Dika Rohman Sholeh<sup>4)</sup>, Rafi Maulana<sup>5)</sup> dan Dhimas Widhi Handani<sup>6)</sup>

<sup>1,2,5,6</sup>Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111

<sup>3</sup>Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111

<sup>4</sup>Teknik Kimia Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111

E-mail: husnaisna17@gmail.com

### Abstract

The rapid advancement in the LNG industry has underscored the importance of harnessing the cold energy generated during the LNG regasification process. This research aims to analyze the technical and economic intricacies of a two-stage LNG regasification system and the ORC, focusing on utilizing the resultant cold energy for fish cold storage. The methodology includes creating, simulating, and analyzing the thermodynamic cycles of the LNG regasification system, ORC, and cold storage. Economic assessments, spanning production costs, capital expenditures, and investments, are conducted through Aspen Plus V12 software. Various working fluids are propane, R32, ethane, R41, and butane. The findings indicate that ethane boasts the lowest total capital cost, trailed by R41, R32, propane, and butane. The highest energy savings were observed in systems utilizing butane, followed by R32, propane, ethane, and R41. Meanwhile, the largest carbon emissions are generated by systems using R41, ethane, R32, propane, and butane as working fluids. Consequently, in this context, the ORC system employing butane emerges as the preferred choice. It offers significant energy savings of  $2.145 \times 10^6$  kJ/h (595.83 kW) or 27.65%, coupled with lower carbon emissions compared to R41, R32, ethane, and propane, however, the capital cost will be quite significant.

**Keywords:** *Cold Storage, Cold Energy, Liquefied Natural Gas, Organic Rankine Cycle*

### Abstrak

Pesatnya perkembangan industri LNG menjadikan pemanfaatan energi dingin hasil dari proses regasifikasi LNG menjadi penting. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teknis dan ekonomis model sistem regasifikasi LNG dan ORC dua tingkat dalam memanfaatkan energi dingin hasil regasifikasi LNG untuk *cold storage* ikan. Metode penelitian dilakukan dengan membuat, mensimulasikan dan menganalisis siklus termodinamika sistem regasifikasi LNG, ORC dan *cold storage* serta melakukan analisis ekonomi meliputi biaya produksi, biaya kapital dan biaya investasi menggunakan *software Aspen Plus V12*. Fluida kerja yang dikaji yaitu propana, R32, etana, R41 dan butana. Dari hasil kajian diketahui bahwa total biaya kapital paling kecil yang menggunakan fluida kerja etana, kemudian R41, R32, propana dan butana. Penghematan energi total terbesar yaitu yang menggunakan butana, disusul oleh R32, propana, etana dan R41. Sedangkan emisi karbon yang dihasilkan paling besar yaitu yang menggunakan fluida kerja R41, etana, R32, propana dan butana. Sehingga dalam hal ini, sistem ORC dengan butana dapat menjadi pilihan utama, karena sistem ORC dengan butana menghasilkan *energy savings* yang cukup besar sebesar  $2,145 \times 10^6$  kJ/h (595,83 kW) atau 27,65%, dengan emisi karbon yang rendah dibandingkan dengan R41, R32, etana dan propana, namun untuk biaya kapital akan cukup besar.

**Kata Kunci:** *Cold Storage, Energi Dingin, Liquefied Natural Gas, Organic Rankine Cycle*

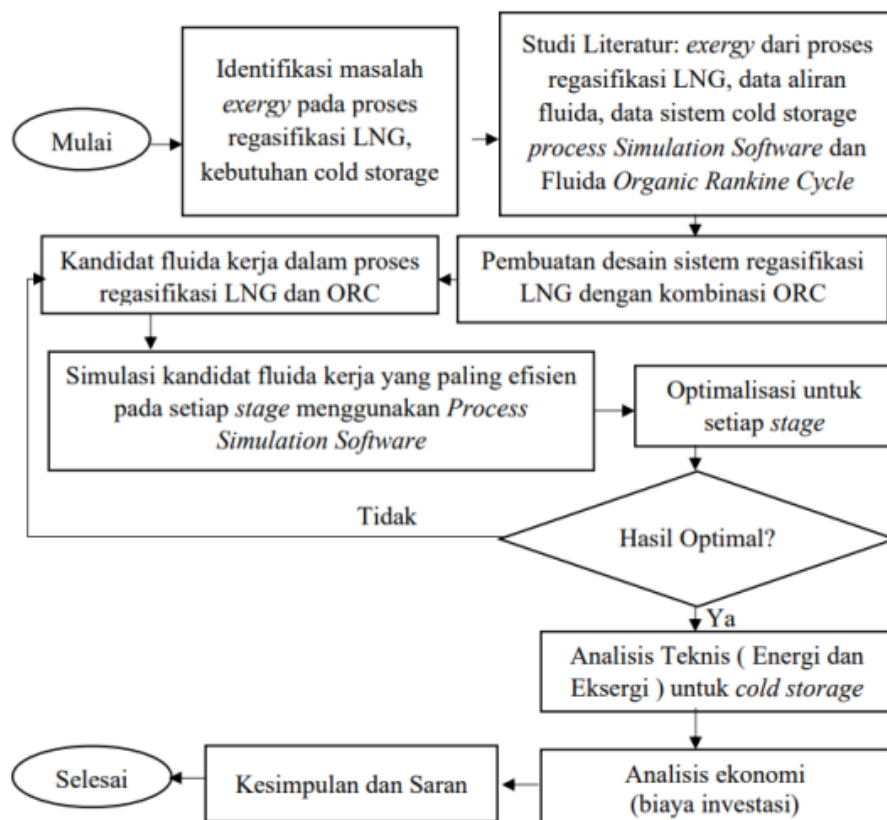
## PENDAHULUAN

Pengembangan energi terbarukan telah lama dilakukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya minyak, salah satunya penggunaan gas alam untuk memenuhi kebutuhan energi (Zou et al., 2016). Perdagangan LNG global mencapai 316,5 juta ton pada tahun 2018, dengan pertumbuhan tahunan sekitar 9,8% (International Gas Union (IGU), 2019). LNG memegang peranan penting di pasar energi global karena memiliki emisi gas rumah kaca yang rendah setelah pembakaran, kemudahan transportasi, dan densitas energi tinggi untuk penyimpanan (Chong et al., 2019). LNG tidak dapat digunakan sebelum di regasifikasi menjadi gas (He et al., 2020). Pada proses regasifikasi LNG terdapat energi yang terbuang sia-sia, yaitu energi dingin (*exergy*). Kapasitas regasifikasi LNG secara global mencapai 795 MTPA yang setara menghasilkan energi dingin sebesar  $6,598 \times 10^{14}$  kJ per tahun (2094 MW) yang terbuang sia-sia (International Gas Union (IGU), 2019). Dengan jumlah energi tersebut jika dimanfaatkan secara efisien dapat meningkatkan efisiensi rantai pasokan LNG dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Riset sebelumnya terkait penggunaan energi dingin hasil dari proses regasifikasi LNG oleh (Zhang et al., 2018) berupa energi dingin LNG terbuang dimanfaatkan untuk *cold storage* dengan mengintegrasikan regasifikasi LNG, *Liquid Air Energy Storage* (LAES) dan menggunakan satu tahap dari *Organic Rankine Cycle* (ORC). (Lee & You, 2019) meneliti pemanfaatan energi dingin dengan mengintegrasikan proses regasifikasi, LAES untuk menghasilkan energi yang efisien.

Berdasarkan riset yang pernah dilakukan tersebut masih sedikit penelitian untuk instalasi ORC menggunakan fluida kerja propana, R32, butana, etana dan R41 serta instalasi ORC dua tingkat. Oleh karena itu, pada riset ini dilakukan desain proses sistem regasifikasi LNG dengan kombinasi ORC dua tingkat dengan air laut sebagai reservoir panas dan LNG sebagai reservoir dingin (Mayasari, 2021). LNG yang dimanfaatkan di sini yaitu energi dingin hasil dari proses regasifikasi LNG. Analisis berbagai fluida kerja berupa propana, *ethana*, butana, R32 dan R41 untuk menghasilkan energi yang lebih optimal pada *cold storage* menggunakan *software Aspen Plus V12*. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk menghitung jumlah energi dan *exergy* yang dihasilkan. Selanjutnya dilakukan perhitungan investasi biaya untuk integrasi sistem regasifikasi LNG dan ORC dua tingkat dengan *cold storage*. Sehingga dari hal tersebut dapat meningkatkan industri *cold storage* yang kompetitif dan ramah lingkungan.

## METODE PENELITIAN

Riset ini menggunakan *Process Simulation Software* dengan *software Aspen Plus* untuk membuat model sistem regasifikasi LNG dengan ORC. *Aspen Plus* memiliki *database* sifat termodinamik berbagai jenis fluida yang dapat dijadikan sebagai pedoman dalam melakukan pemodelan siklus termodinamik (B. Li et al., 2020). Tahapan-tahapan riset yang akan dilaksanakan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Riset

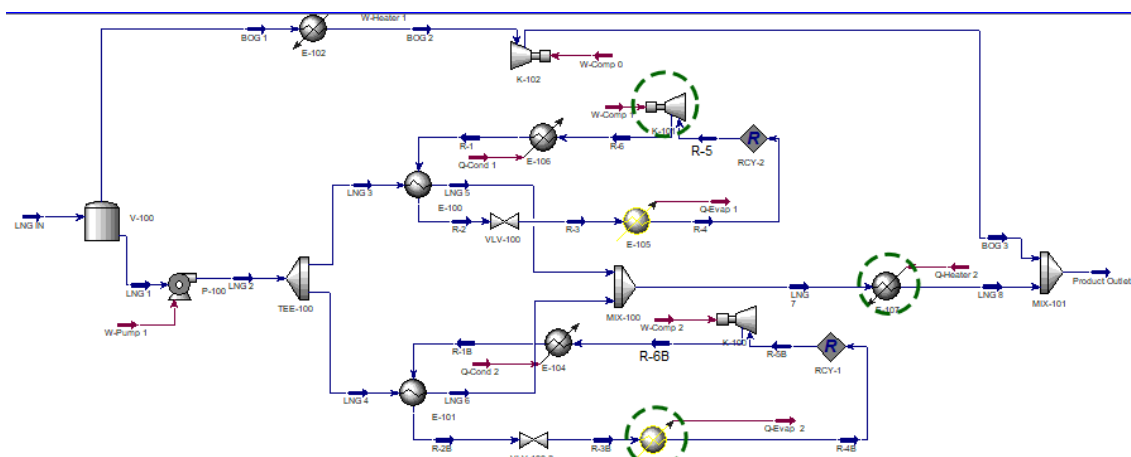
Pada riset ini, dilakukan identifikasi masalah mengenai energi dingin hasil dari proses regasifikasi LNG yaitu energi yang terbuang sia-sia dapat mengurangi efisiensi kerja dan menimbulkan emisi karbon. Pemanfaatan energi dingin tersebut seharusnya dapat digunakan untuk melakukan proses pendinginan pada *cold storage* ikan.

Studi literatur dilakukan dengan mencari dasar teori maupun riset-riset sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya mengenai *exergy* dari proses regasifikasi LNG dan mencari parameter yang digunakan dalam simulasi menggunakan *Aspen Plus V12*. Parameter dalam simulasi didapat dari Lee and You (2019) pada Tabel 1. Berikut.

Tabel 1.  
Parameter Simulasi Sistem Regasifikasi LNG dengan ORC

Parameter Simulasi	Nilai	Parameter Simulasi	Nilai
Temperatur LNG	-162°C	Tekanan Atmosfer	1.013 bar
Aliran massa LNG	1 kg/s	Suhu pelepasan pemanas	15°C
Tekanan LNG	1.3 bar	Efisiensi isentropik pompa	0.9
Efisiensi isentropik kompresor udara	0.9	Efisiensi isentropik pompa	0.9
Suhu saluran masuk udara dan suhu air laut	25°C	Efisiensi isentropik ekspander	0.92

Desain sistem regasifikasi LNG dengan kombinasi ORC dua tahap dibuat menggunakan *Aspen Plus V12*. Untuk proses flow diagramnya dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Proses Flow Diagram Sistem Regasifikasi LNG-ORC-Cold storage

Kandidat fluida kerja yang dikaji adalah propana, *ethana*, butana, R32 dan R41 dengan massa molar berdasarkan Fikri, M Habib Chusnul *and* Hendrarsakti, Jooned (2019) seperti pada tabel 2 berikut.

Tabel 2.  
Kandidat Fluida Kerja

Nama	Rumus Kimia	Massa Molar	Titik Didih	Nama	Rumus Kimia	Massa Molar	Titik Didih
<i>Ethane</i>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07 g/mol	-182,8 °C	R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	52,02 g/mol	-52 °C
<i>Butane</i>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,12 g/mol	-0,4 °C	R41	CH <sub>3</sub> F	34,03 g/mol	-78,4 °C
<i>Propane</i>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1 g/mol	-42,25 °C				

Analisis teknis berupa analisis termodinamika pada energi dan *exergy*. Hasil simulasi menjadi bahan untuk analisis kebutuhan daya listrik yang digunakan dari sistem yang terintegrasi yaitu *cold storage*. Persamaan analisis energi dapat dinyatakan dalam persamaan 1 dan 2 berikut (S. Li et al., 2017).

$$\text{Spesifik konsumsi energi} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \right] = \frac{(W_{\text{air,comp}} + W_{\text{LNG,pump}})}{m_{\text{Lair}}} \quad (1)$$

Sedangkan persamaan eksergi seperti berikut (Fakharzadeh et al., 2023) .

$$Ex_{total} = Ex^{PH} + Ex^{CH} \quad (2)$$

Analisis ekonomis dilaksanakan untuk menentukan biaya investasi dari integrasi sistem. Analisis ekonomi didapatkan dari hasil simulasi menggunakan *Aspen Plus V12* dengan rumusan analisis ekonomi untuk perhitungan *Capital Perpendicular* (CAPEX) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Lee & You, 2019).

$$CAPEX = (1 + f1 + f2 \dots + fn)E \quad (3)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Analisis Energy

Dalam model sistem yang dibuat pada *Aspen Plus V12* menggunakan parameter komposisi LNG seperti pada tabel 1 dengan menggunakan kandidat fluida kerja yang tercantum pada tabel 2 yaitu propana, R37, etana, R41 dan butana. Hasil dari simulasi tersebut berupa data *energy saving* untuk tiap fluida kerja seperti pada tabel 3 berikut.

Tabel 3.  
*Energy Savings* tiap Fluida Kerja

Property	Butana		R41		Etana		R32		Propana	
	Energy Saving	% of Actual	Energy Saving	% of Actual	Energy Saving	% of Actual	Energy Saving	% of Actual	Energy Saving	% of Actual
Total Utilities (kJ/h)	2,145 x 10 <sup>6</sup>	27.65	0	0	0	0	2,263 x 10 <sup>6</sup>	15.82	1,102x 10 <sup>6</sup>	8.12
Heating Utilities (kJ/h)	1,072 x 10 <sup>6</sup>	16.04	0	0	0	0	1,13 x 10 <sup>6</sup>	8.59	5,5 x 10 <sup>5</sup>	4.23
Cooling Utilities (kJ/h)	1,073 x 10 <sup>6</sup>	100	0	0	0	0	1,133 x 10 <sup>6</sup>	100	5,523x 10 <sup>5</sup>	100
Carbon Emissions (kg/h)	120	27.66	0	0	0	0	126.7	15.83	61.77	8.13

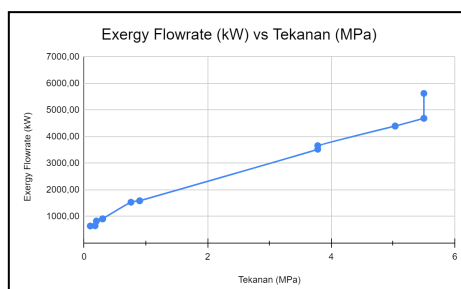
Dari ke-5 kandidat fluida kerja tersebut dapat diketahui bahwa terjadi penghematan energi total terbesar pada kandidat fluida kerja Butana sebesar 2,145 x 10<sup>6</sup> kJ/h (595,83 kW) atau 27,65%, disusul oleh R32 sebesar 2,263 x 10<sup>6</sup> kJ/h (628,61 kW) atau 15,82%, selanjutnya disusul oleh Propana sebesar 1,102x10<sup>6</sup>kJ/h (306,11 kW) atau 8,12% dan Ethana serta R41 yang penghematan energi totalnya sebesar 0kJ/h atau 0%. Dan emisi karbon yang dihasilkan paling besar yaitu R41, Etana, R32, Propana dan Butana.

## B. Analisis Exergy

Berdasarkan fluida kerja tersebut maka nilai dari massa entropi dan massa *exergy* untuk sistem integrasi regasifikasi LNG-ORC-*cold storage* seperti pada tabel 4 berikut.

Tabel 4.  
Parameter Aliran Material Sistem Regasifikasi LNG-ORC-*Cold Storage*

Aliran Integrasi	Temperatur	Tekanan	Laju Aliran Massa	Massa Enthalpi	Massa Entropi	Massa Exergy	Exergy Flowrate
	C	MPa	kg/s	kJ/kg	kJ/kg-C	kJ/kg	kW
LNG 1	-153	0,18	6,12	-5746,25	4,42	674,05	6201,30
LNG 2	-150	5,5	5,56	-5728,13	4,46	611,52	5626,02
LNG 3	-150	5,5	2,78	-5728,13	4,46	305,82	4689,19
LNG 4	-150	5,5	2,78	-5728,13	4,46	305,82	4689,19
LNG 5	-55,35	5,04	2,78	-5152,5	7,34	286,93	4399,53
LNG 6	-55,35	5,04	2,78	-5152,5	7,34	286,93	4399,53
LNG 7	-55,35	5,04	5,56	-5152,5	7,34	573,75	4398,74
LNG 8	16,38	0,76	5,56	-4816,88	9,34	600,81	1535,41
R1	90	3,78	8,14	-6518,75	7,53	1274,14	3256,13
R2	-25,43	0,2	8,14	-700	7,53	90,01	828,13
R3	-42,49	0,1	8,14	-700	7,20	69,77	641,86
R4	-14	0,3	8,14	-669,38	7,88	98,98	910,64
R5	-14	0,3	8,14	-669,38	7,88	98,98	910,64
R6	40,79	0,9	8,14	-648,75	8,03	172,83	1590,04
R1B	90	3,78	8,14	-6518,75	7,53	1274,14	3663,15
R2B	-25,43	0,2	8,14	-700	7,53	90,01	828,13
R3B	-42,49	0,1	8,14	-700	7,20	69,77	641,86
R4B	-14	0,3	8,14	-669,38	7,88	98,98	910,64
R5B	-14	0,3	8,14	-669,38	7,88	98,98	910,64
R6B	40,79	0,9	8,14	-648,75	8,03	172,83	1590,04



Gambar 3 Exergy Flowrate dan Tekanan

Dari Tabel 4 dapat diketahui bahwa laju eksergi LNG di bawah tekanan regasifikasi LNG yang berbeda-beda akan meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3. berikut.

Tabel 5 berikut menunjukkan kehilangan debit aliran exergy dan efisiensi energi dari sistem integrasi regasifikasi LNG dengan *cold storage* seperti pada gambar 3.2 dan peralatannya yang dihitung dengan persamaan 1 dan 2.

Tabel 5.  
Exergy Flowrate Loss (Ex) and Exergy Efficiency ( $\eta$ )

No	Peralatan	Ex (kW)	$\eta$	No	Peralatan	Ex (kW)	$\eta$
1	Pompa	663,71	89,45%	6	Evaporator 1	241,61	84,81%
2	Expansion valve 1	186,26	77,51%	7	Evaporator 2	514,70	19,81%
3	Expansion valve 2	186,26	77,51%	8	Evaporator 3	163,91	89,69%
4	Kompresor 1	877,60	64,44%	9	Evaporator 4	514,81	19,79%
5	Kompresor 2	877,60	64,44%				

### C. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi dari kombinasi sistem regasifikasi LNG dan sistem ORC tiap kandidat fluida kerja dengan menggunakan di *Aspen Plus V12* sesuai dengan persamaan 3 dan 4 didapatkan analisis ekonomi seperti pada tabel 6 berikut.

Tabel 6.  
Data Hasil Analisis Ekonomi

Fluida Kerja	Total Biaya Kapital (USD)	Total Biaya Produksi (USD/Year)	Total Biaya Utilities (USD/Year)	Desired Rate of Return (Percent/Year)
Propana	12.677.200	5.173.070	2.993.950	20
R32	8.584.730	4.166.460	2.231.190	20
Etana	8.057.770	3.565.890	1.692.700	20
R41	8.552.950	4.341.540	2.393.300	20
Butana	12.677.200	5.173.070	2.993.950	20

### D. Sistem Refrigerasi *Cold Storage*

Gambar 2 menunjukkan diagram aliran proses regasifikasi LNG dan kombinasi ORC dan ruang pendingin dengan beban pendingin desain berdasarkan (S. Li et al., 2017) yaitu 110 KW dengan suhu desain desain  $-15^{\circ}\text{C}$ . Dalam sistem pendinginan terdapat istilah *Coefficient of Performance* (COP), yaitu mengukur perbandingan antara panas yang diserap oleh *evaporator* dengan kerja yang dilakukan oleh kompresor (Huang et al., 2022). Nilai COP ini mencerminkan efisiensi sistem pendinginan. COP dari sistem *cold storage* pada riset ini didefinisikan dengan persamaan

$$COP = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + E_{LNG}}{Q_{LNG} + W_{pu} + W_{com,1} + W_{com,2}}$$

didapatkan nilai COP yaitu 0,973, untuk COP ideal dapat

dihitung sebagai berikut:  $COP_c = \frac{T_{\text{evaporasi}}}{T_{\text{kondensasi}} - T_{\text{evaporasi}}} = \frac{-55,35+273}{84,48 - (-55,35)} = 1,56$ . Sehingga

efisiensi sistem refrigrasi didapatkan sebesar :  $\eta_{\text{refrigerasi}} = \frac{COP_c}{COP_e} \times 100\% = \frac{0,973}{1,56} \times 100\% = 62,55\%$

## SIMPULAN

Dari hasil simulasi, kombinasi sistem regasifikasi LNG dan sistem ORC menunjukkan biaya kapital terendah dengan ethana (\$8.057.770), diikuti oleh R41 (\$8.552.950), R32 (\$8.584.730), propana (\$12.677.200), dan butana (\$12.677.200). Penghematan energi terbesar dicapai dengan butana (2,145 x 106 kJ/h atau 595,83 kW) atau 27,65%, diikuti oleh R32 (2,263 x 106 kJ/h atau 628,61 kW) atau 15,82%, dan propana (1,102 x 106 kJ/h atau 306,11 kW) atau 8,12%. Etana dan R41 tidak menunjukkan penghematan energi. Emisi karbon tertinggi terjadi pada R41, Etana, R32, Propana, dan Butana. Oleh karena itu, sistem ORC dengan butana menjadi pilihan utama karena memberikan penghematan energi besar dengan emisi karbon rendah dibandingkan dengan R41, R32, ethana, dan propana, meskipun biaya kapitalnya cukup tinggi. Efisiensi sistem refrigrasi *cold storage* yang dihasilkan sebesar 62,55%.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chong, Z. R., He, T., Babu, P., Zheng, J., & Linga, P. (2019). Economic evaluation of energy efficient hydrate based desalination utilizing cold energy from liquefied natural gas (LNG). *Desalination*, 463, 69–80.
- Fakharzadeh, M., Tahouni, N., Abbasi, M., & Panjeshahi, M. H. (2023). Optimization and Exergy Analysis of a Cascade Organic Rankine Cycle Integrated with Liquefied Natural Gas Regasification Process. *International Journal of Refrigeration*.
- Fikri, M Habib Chusnul, & Hendrarsakti, Jooned. (2019). *Analisis Tekno Ekonomis Kombinasi Siklus Rankine Organik Dan Sistem Regasifikasi Lng Untuk Sistem Suplai Gas Pembangkit Listrik* [Institut Teknologi Bandung]. h
- He, T., Lv, H., Shao, Z., Zhang, J., Xing, X., & Ma, H. (2020). Cascade utilization of LNG cold energy by integrating cryogenic energy storage, organic Rankine cycle and direct cooling. *Applied Energy*, 277, 115570.
- Huang, Z. F., Soh, K. Y., Wan, Y. D., Islam, M. R., & Chua, K. J. (2022). Assessment of an intermediate working medium and cold energy storage (IWM-CES) system for LNG cold energy utilization under real regasification case. *Energy*, 253.
- International Gas Union (IGU). (2019). *IGU World LNG Report 2019*. Technical report, International Gas Union.
- Lee, I., & You, F. (2019). Systems design and analysis of liquid air energy storage from liquefied natural gas cold energy. *Applied Energy*, 242, 168–180.
- Li, B., Yang, Q., Zhang, R., & Yang, S. (2020). Design and simulation optimization of cold storage and air conditioning system in LNG powered carrier by using cold



- energy of LNG based on HYSYS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 467(1), 012019.
- Li, S., Wang, B., Dong, J., & Jiang, Y. (2017). Thermodynamic analysis on the process of regasification of LNG and its application in the cold warehouse. *Thermal Science and Engineering Progress*, 4, 1–10.
- Mayasari, D. S. (2021). *Review: Proses Pencairan Gas Alam (LNG) Sebagai Sumber Energi (Liquefied Natural Gas (LNG) As An Energy Source)*.
- Zhang, T., Chen, L., Zhang, X., Mei, S., Xue, X., & Zhou, Y. (2018). Thermodynamic analysis of a novel hybrid liquid air energy storage system based on the utilization of LNG cold energy. *Energy*, 155, 641–650.
- Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., & Xiong, B. (2016). Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B*, 3(1), 1–11.