

Kajian Kelayakan Pemilihan Teknologi *Reliquefaction Plant* atau *MSO Compressor* Sebagai Alternatif Pemanfaatan *Boil Off Gas* (BOG) pada FSRU 170.000 m³

Hanif Nur Fauzi Margono, I Made Ariana dan Beny Cahyono
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ariana@its.ac.id

Abstrak—*Boil Off Gas* (BOG) merupakan gas yang terbentuk karena adanya panas yang masuk (*heat leak*) kedalam tangki *Liquefied Natural Gas* (LNG). Evaporasi yang terjadi secara terus menerus dapat meningkatkan tekanan pada tangki, menyebabkan tekanan berlebih yang berbahaya. BOG tersebut harus dimanfaatkan atau dibuang melalui proses pembakaran untuk menjaga tekanan tangki muatan. BOG yang dibuang merupakan sebuah kerugian bagi perusahaan. Pada FSRU ini memiliki nilai rata – rata BOG perharinya sebesar 92.714,936 m³n Gas dan *boil off rate* 0,237%. Pemanfaatan BOG pada FSRU digunakan untuk bahan bakar generator DFDE dan boiler dengan nilai rata – rata perharinya 837,363 MMBTU, sehingga memiliki nilai BOG berlebih rata – rata perharinya 2.823,184 MMBTU. Metode pemanfaatan BOG berlebih dengan melakukan *reliquefaction*, atau langsung menyalurkannya ke *linepack offshore pipeline* menggunakan *MSO compressor*. Dalam pemilihannya, menggunakan *reliquefaction plant* Wartsila HGS Mark III, menggunakan siklus kerja *inverse brayton*, berkapasitas 7.000 kg/h. Sedangkan untuk *MSO compressor* menggunakan BOG kompresor Burckhard Laby GI Compressor LP250 4 stages, kapasitas 10.000 kg/h. Berdasarkan aspek ekonomis penggunaan *MSO compressor* memiliki nilai CAPEX dan OPEX lebih rendah, tetapi secara nilai NPV, IRR dan PP penggunaan *reliquefaction plant* memiliki nilai lebih baik. Sedangkan berdasarkan kondisi operasional FSRU, *reliquefaction plant* lebih cocok secara teknis untuk digunakan.

Kata Kunci—*Boil Off Gas*, FSRU, LNG, *MSO Compressor*, *Reliquefaction Plant*.

I. PENDAHULUAN

Salah satu alternatif bahan bakar yang dapat dimanfaatkan adalah gas bumi. Gas bumi merupakan energi primer ketiga yang paling banyak digunakan didalam negeri setelah minyak bumi dan batubara. Berdasarkan PP No. 79 Tahun 2014, Kebijakan Energi Nasional (KEN), target proporsi gas bumi dan EBT pada bauran energi nasional di 2050 adalah 55%. Cadangan gas bumi Indonesia per Januari 2017 mencapai 142.72 TSCF, sebesar 100.36 TSCF merupakan cadangan terbukti dan 42.36 TSCF merupakan cadangan potensial [1]. Pemanfaatan gas bumi Indonesia untuk domestik dari tahun ke tahun meningkat, dengan peningkatan rata – rata 7%. Tentunya dalam hal ini diperlukan peningkatan infrastruktur dalam menunjang optimalisasi penggunaan gas. Khususnya dalam penggunaan LNG dibutuhkan fasilitas penerima LNG atau *LNG receiving* dan *regasification terminal* seperti halnya *Floating Storage Regasification Unit* atau FSRU.

Selama proses penyimpanan LNG, dimungkinkan terjadi panas yang masuk kedalam tangki penyimpanan atau disebut

dengan *heat leak* sehingga dapat menyebabkan LNG terevaporasi menjadi gas yang disebut dengan *Boil Off Gas* (BOG). Evaporasi yang berterusan dapat meningkatkan tekanan pada tangki, yang dapat menyebabkan tekanan yang berlebih yang sangat berbahaya. Gas tersebut harus dibuang atau ditangani dengan khusus. BOG dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar, dicairkan kembali, atau dikompresi dan dialirkan melalui pipa jaringan gas transmisi atau distribusi ke konsumen. Namun dalam hal ini di FSRU, BOG akan dialirkan ke *Dual Fuel Diesel Engine* (DFDE) untuk menghasilkan energi listrik, *auxiliary boiler* untuk pemanas dan *Gas Combustion Unit* (GCU) untuk dibakar dan dibuang dalam bentuk karbon atau CO₂. Hal itu tentunya menimbulkan kerugian karena BOG yang berlebih tersebut dapat dimanfaatkan kembali dan memiliki nilai komersial yang cukup tinggi.

Saat beroperasi secara normal BOG yang dihasilkan dari tangki LNG sekitar 0.10 – 0.15% berdasarkan berat per harinya [2]. FSRU ini memiliki kapasitas penyimpanan sebesar 170.000 m³. Menurut perhitungan BOG yang dihasilkan adalah 255 m³ yang dikonversikan menjadi 6.000 MMBTUd. BOG tersebut digunakan untuk bahan bakar generator dan kebutuhan FSRU lainnya sebesar 2.000 MMBTUd. Kebutuhan dari FSRU ini adalah 3 generator menggunakan Wartsila 6L50DF, regasifikasi dan peralatan lainnya. Sehingga terdapat BOG berlebih yang tidak dimanfaatkan sebesar 4.000 MMBTUd yang dibuang dengan furnace. Dengan harga LNG saat ini US\$ 10 per MMBTU, BOG berlebih yang tidak dimanfaatkan bisa mencapai US\$ 40.000. Sedangkan metode pemanfaatan BOG lainnya dapat menggunakan *MSO compressor* yang nantinya akan dialirkan ke jaringan pipa gas dan disimpan pada *linepack pipeline* atau dirubah menjadi LNG kembali dengan *reliquefaction plant*. Pada saat ini fasilitas tersebut belum ada di FSRU tersebut. Oleh karena itu diperlukan sebuah kajian kelayakan antara *MSO compressor* dan *reliquefaction plant* sebagai bentuk rekomendasi pemanfaatan BOG berlebih dari segi teknis maupun ekonomi beserta perancangan desain sistem yang tepat pada FSRU dengan kapasitas penyimpanan 170.000m³.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Perumusan Masalah

Penelitian ini dilatar belakangi oleh suatu permasalahan dalam pemanfaatan BOG pada FSRU, sehingga memerlukan

Tabel 1.
Nilai muatan LNG dan BOG pada FSRU

Bulan	Muatan LNG		BOG	
	(MMBTU)	(m ³)	(MMBTU)	[m ³ (LNG)]
Januari	15.278.989	635.605,96	85.997,49	3.730,7
Februari	20.558.556	855.235,91	86.449,64	3.741,16
Maret	67.780.385	2.819.664	110.212,81	4.836,86
April	78.965.028	3.284.945	162.256,52	7.189,18
Mei	67.486.321	2.807.431	166.769,42	7.361,29
Juni	46.086.428	1.917.195	159.393,99	7.003,94
Juli	37.385.372	1.555.231	150.490,4	6.601,13
Agustus	83.351.852	3.467.437	100.387,75	4.341,02
September	46.900.940	1.951.079	79.475,16	3.494,38
Oktober	78.651.734	3.271.912	80.827,47	3.587,79
November	55.325.503	2.301.541	87.628,59	3.881,84
Desember	4.562.706	189.809	86.003,25	3.809,84
Total	602.333.814	25.057.087	1.355.892	59.579,14
Rata-Rata/Bulan	50.194.484	2.088.091	112.991,04	4.964,93
Rata-Rata/Hari	1.650.230	68.650	3.714,77	163,23

Tabel 2.
Karakteristik Indonesia – Badak LNG

Origin	LNG Density (kg/m ³)	Gas Density (kg/m ³)	Expansion ratio (m ³ n/m ³ liq)	GCV (MJ/m ³ n)
Indonesia-Badak	456	0,801	568	43,9

Tabel 3.
Nilai BOG selama setahun pada FSRU

Bulan	MMBTU	BOG	
		m ³ (LNG)	m ³ n
Januari	85.997,49	3.730,7	2.031.979
Februari	86.449,64	3.741,16	2.124.976
Maret	110.212,81	4.836,86	2.747.339
April	162.256,52	7.189,18	4.083.453
Mei	166.769,42	7.361,29	4.181.212
Juni	159.393,99	7.003,94	3.978.239
Juli	150.490,4	6.601,13	3.749.442
Agustus	100.387,75	4.341,02	2.465.701
September	79.475,16	3.494,38	1.984.809
Oktober	80.827,47	3.587,79	2.037.864
November	87.628,59	3.881,84	2.204.886
Desember	86.003,25	3.809,84	2.163.990

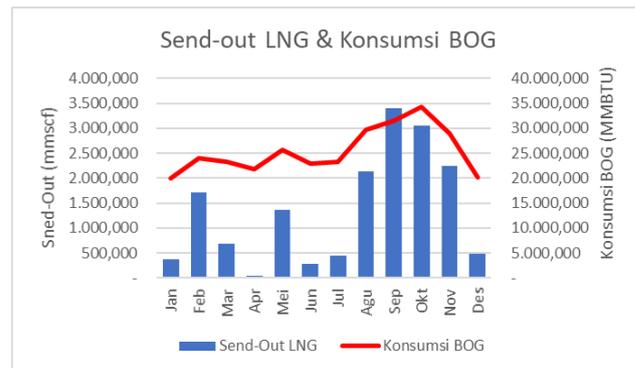
kajian kelayakan teknologi yang akan digunakan untuk pemanfaatan BOG pada FSRU. Berdasarkan latar belakang tersebut, dilakukan kajian terhadap masalah – masalah yang dapat terjadi pada objek penelitian. Setelah menentukan masalah yang terjadi maka dapat dilakukan perumusan masalah terhadap obek yang akan diteliti. difokuskan pada rumusan masalah yang diambil dari masalah – masalah yang terjadi pada objek dan tujuan penelitian, yang dibatasi oleh batasan – batasan permasalahan yang ada sehingga hasil dari penelitian menjadi tepat sasaran.

B. Studi Literatur

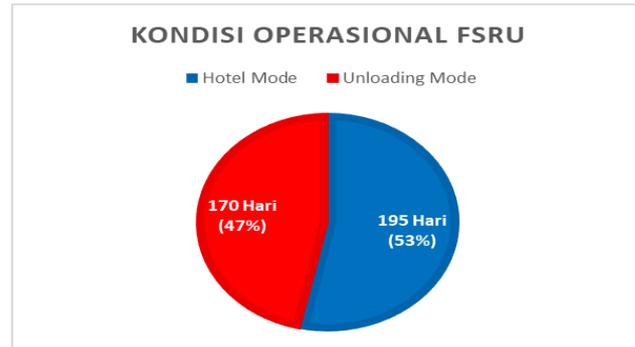
Studi literatur merupakan tahapan selanjutnya untuk mendapatkan informasi yang mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini. Informasi tersebut berupa teori, metode pengerjaan, regulasi, dan standar. Studi literatur dapat diperoleh dengan membaca buku, jurnal, paper, regulasi dan standar terkait bahasan pada tugas akhir ini. Hal – hal tersebut digunakan sebagai referensi dan dasaran dari penelitian ini.

C. Pengumpulan Data

Tahapan selanjutnya merupakan pengumpulan data. Penelitian ini membutuhkan studi literatur dan data secara aktual sebagai bahan pertimbangan, penunjang dan sebagai acuan untuk perhitungan serta desain yang akan dibuat. Beberapa data yang diperlukan, seperti berikut;



Gambar 1. Data perbandingan kondisi *send-out* LNG dengan konsumsi BOG.



Gambar 2. Kondisi operasional FSRU selama satu tahun.

Tabel 4.
Nilai BOG berlebih pada FSRU

Kondisi	Hotel Mode	Low Gas Supply	Normal Gas Supply	Max Gas Supply
	195 Hari	105 Hari	45 Hari	20 Hari
Maks	8.278,88	7.665,25	6.462,43	7.587,22
Min	19,97	0	0	0
Total	701.428,85	232.512,08	72.481,49	24.039,66
Rata-Rata	3.597,07	2.214,40	1.610,70	1.201,98

(1)Spesifikasi FSRU; (2)Data operasional BOG terdiri antara lain : (a)Nilai BOG yang dihasilkan; (b)Nilai muatan LNG; (c)Kondisi send-out FSRU; (d)Penggunaan bahan bakar gas (BOG) pada peralatan di FSRU; (3)Harga indikatif untuk *reliequefaction plant* dan *MSO compressor*.

D. Penghitungan Nilai BOG pada FSRU

Pada rumusan masalah pertama pada penelitan ini adalah mengetahui nilai BOG yang dihasilkan dan *boil off rate* dari FSRU. Untuk melakukan perhitungan kondisi BOG yang dihasilkan didapatkan dari dataa nilai BOG perharinya selama satu tahun dan nilai muatan LNG perharinya selama satu tahun. Dari data tersebut dilakukan perhitungan untuk mencari nilai total BOG yang dihasilkan selama setahun dan rata – rata produksi BOG perharinya, serta persentase berdasarkan kondisi operasional dari *boil off rate* daripada FSRU tersebut untuk membandingkannya dengan spesifikasi yang diberikan dari *storage tank*.

E. Penghitungan Nilai BOG Berlebih pada FSRU

Untuk mengetahui spesifikasi teknologi pemanfaatan BOG maka diperlukan untuk mengetahui nilai BOG berlebih dari FSRU yang dapat dimanfaatkan. Nilai BOG berlebih dari FSRU ini didapatkan dari hasil perhitungan dari nilai BOG yang dihasilkan dan dikurangi dari kebutuhan bahan bakar gas (BOG) daripada peralatan yang ada di FSRU pada hal ini

Tabel 5.
Nilai BOG berlebih selama satu tahun

Bulan	BOG Berlebih (MMBTU)
Januari	66.134,67
Februari	62.587,85
Maret	88.641,11
April	140.482,82
Mei	141.084,82
Juni	136.513,49
Juli	129.333,76
Agustus	71.282,05
September	51.452,53
Oktober	50.548,4
November	59.129,63
Desember	65.808,64
Total	1.030,46
Rata-Rata/Bulan	85.872
Rata-Rata/Hari	2.823
Rata-Rata/Jam	118

Tabel 6.
Nilai BOG berlebih pada FSRU

Kondisi	BOG Berlebih			
	MMBTU	m ³ Gas	kg	kg/h
Hotel Mode	8.278,88	201.673,58	161.540,53	6.730,86
Low Gas Supply	7.665,26	186.725,60	149.567,21	6.231,97
Normal Gas Supply	6.462,43	157.424,90	126.097,34	5.254,06
Max Gas Supply	7.587,22	184.824,68	148.044,57	6.168,52

Tabel 7.
Komposisi BOG

Operating Mode	Unloading Mode	Hotel Mode	
Gas Composition (Mole Fractions)			
Methane	0,933	0,929	
Nitrogen	0,066	0,071	
Mass Flow	kg/h	6.231,97	6.730,86
Inlet Pressure	bar	1	1
	psia	14,504	14,504
Inlet Temperature	°C	-160	-160
	°F	-256	-256
Discharge Pressure	bar	76,53	76,53
	psia	1.109,97	1.109,97
	psig	1.095	1.095
Discharge Temperature	°C	18,3	18,3
	°F	361,4	361,4

yaitu generator DFDE dan boiler.

F. Penghitungan Spesifikasi Komponen Sistem

Pada tahapan ini dilakukan perhitungan untuk mengetahui kebutuhan komponen pada sistem *minimum Sent Out Compressor* dan *reliequfaction plant*. Sehingga dari perhitungan kebutuhan komponen, dapat ditentukan komponen-komponen dengan spesifikasi yang sesuai untuk sistem *minimum sent out compressor* dan *reliequfaction plant* pada FSRU tersebut, serta disesuaikan dengan standar yang digunakan atau *best engineering practice* yang berlaku.

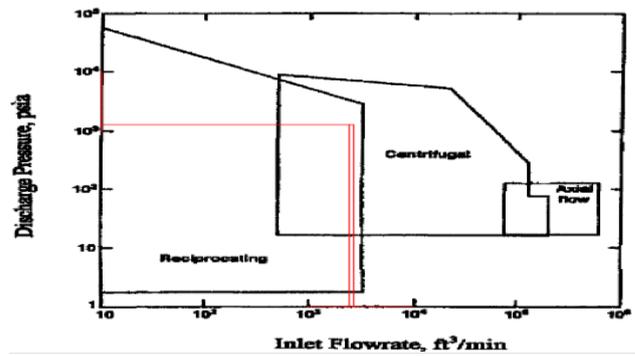
G. Perancangan P&ID Sistem

Setelah melakukan perhitungan spesifikasi komponen berdasarkan kebutuhan yang telah ditentukan pada tahap sebelumnya. Sehingga dapat dilakukan penggambaran P&ID yang sesuai dan realistis dengan FSRU tersebut.

H. Analisa Kelayakan Ekonomi

Setelah mendapatkan perhitungan dan penggambaran sistem yang sesuai dan layak dipasang pada FSRU tersebut, langkah selanjutnya adalah menghitung estimasi biaya investasi pada pemasangan teknologi dan melakukan analisis kelayakan dari segi ekonomi. Antara lain berisi :

1. *Capital expenditure* (CAPEX).



Gambar 3. Grafik pemilihan kompresor.

Tabel 8.
Perbandingan kompresor *reciprocating* dengan sentrifugal

	Reciprocating	Centrifugal
Kapasitas	Kecil - Menengah	Menengah - Besar
Dis. Pressure	Tinggi	Rendah
Space	Besar	Kecil
Suction Temperature Range	Lebar	Sempit
Kontrol Kapasitas	25,50,70,100%	80-100%
Efisiensi	Tinggi	Menengah
Driver Output	Kecil	Besar

Tabel 9.
Perhitungan tiap stage kompresor

1st stage	Suction	Ps =	14,50	psi
	Discharge	Pd =	45,80	psi
2nd stage	Suction	Ps =	42,90	psi
	Discharge	Pd =	129,78	psi
3rd stage	Suction	Ps =	126,88	psi
	Discharge	Pd =	378,18	psi
4rd stage	Suction	Ps =	375,28	psi
	Discharge	Pd =	1.109,97	psi

2. *Operational expenditure* (OPEX).
3. Pemasukan (*revenue*).
4. *Net present value* (NPV).
5. *Internal rate of return* (IRR).
6. *Payback period* (PP).

I. Studi Komparasi

Setelah mengetahui kelayakan dari segi teknis dan ekonomi pada sistem MSO *compressor* dan *reliequfaction plant*, dibandingkan secara kualitatif dan kuantitatif untuk selanjutnya dapat memberikan rekomendasi kedepannya terhadap FSRU tersebut.

J. Saran dan Kesimpulan

Tahap terakhir pada penelitian ini adalah kesimpulan dan saran yang didapatkan dengan menyelesaikan semua tahapan penelitian dan harus menjawab semua permasalahan yang sudah dirumuskan. Sehingga saran yang diberikan dan penelitian ini dapat dijadikan dasar untuk penelitian selanjutnya terkait dengan pengaplikasian pemanfaatan BOG berlebih pada FSRU.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Boil Off Gas (BOG)

Parameter pertama dalam melakukan penelitian ini adalah mengetahui BOG yang dihasilkan daripada FSRU tersebut. Jumlah BOG yang dihasilkan bergantung daripada jenis *cargo tank* yang digunakan oleh FSRU tersebut. Pada FSRU ini menggunakan sistem *cargo tank* Gaz Transport & Technigaz (GTT) Mark III *membrane system*. Berdasarkan

Name	1	2
Vapour	1,0000	1,0000
Temperature [C]	-160,0	128,7
Pressure [kPa]	100,0	7653
Molar Flow [kgmole/h]	370,2	370,2
Mass Flow [kg/h]	6232	6232
LiqVol Flow [m3/h]	19,38	19,38
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7,622e+004	-6,677e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	150,7	157,0
Heat Flow [kJ/h]	-2,822e+007	-2,472e+007

Gambar 4. Simulasi Aspen HYSYS pada *unloading mode*.

Name	1	2
Vapour	1,0000	1,0000
Temperature [C]	-160,0	129,1
Pressure [kPa]	100,0	7653
Molar Flow [kgmole/h]	398,4	398,4
Mass Flow [kg/h]	6731	6731
LiqVol Flow [m3/h]	20,82	20,82
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7,584e+004	-6,639e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	150,6	157,0
Heat Flow [kJ/h]	-3,022e+007	-2,645e+007

Gambar 5. Simulasi Aspen HYSYS pada *hotel mod*.

Tabel 10.
Kesimpulan desain BOG kompresor

Spesifikasi	Keterangan			
Type	<i>Reciprocating Staged</i>			
Jumlah stage	4			
Bahan	<i>Carbon Stell</i>			
Kondisi operasi	P suction	100kPa	T suction	-160°C
	P discharge	7.653kPa	T discharge	129,1°
Kapasitas (Kg/jam)	6.731			
Ratio Kompresor	2,958			

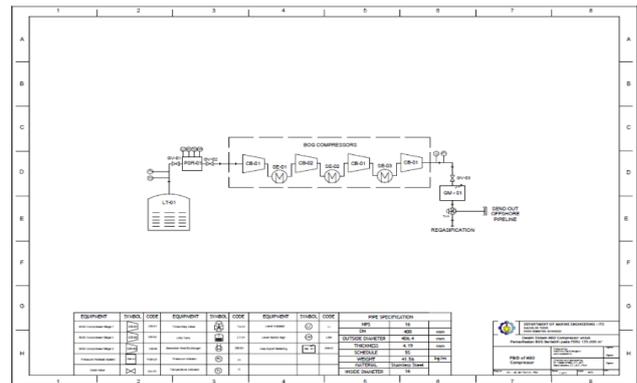
ketentuan dari spesifikasi *cargo tank*, *boil-off rate* memiliki nilai 0,15 – 0,125% dari volume muatan yang ada pada *cargo tank*. Sedangkan untuk volume muatan dari FSRU ini memiliki nilai 170.000 m³. Namun pada kondisi nyata, perhitungan secara teoritis tersebut tidak selalu benar secara nilainya, Karena *cargo tank* FSRU setiap harinya bervariasi, dan nilai BOR yang terjadi bergantung dengan kondisi operasional dari FSRU tersebut. Berdasarkan data yang didapatkan nilai muatan LNG dan BOG yang dihasilkan dalam satu tahunnya pada FSRU berdasarkan Tabel 1.

Hasil dari BOR berdasarkan rata – rata harian kondisi FSRU memiliki nilai 0,237%, nilai tersebut didapatkan dari hasil pembagian rata – rata perhari volume muatan LNG dengan nilai rata – rata perhari BOG. Berdasarkan perhitungan memiliki nilai yang lebih tinggi dari spesifikasi *cargo tank* yang ada pada FSRU tersebut.

Selanjutnya nilai BOG pada data yang diberikan merupakan nilai volume saat dalam kondisi LNG sehingga perlu dikonversi menjadi nilai volume dalam Natural Gas. Dikarenakan LNG yang digunakan FSRU ini berasal dari Indonesia – Badak [3] maka memiliki komposisi berdasarkan Tabel 2.

Untuk mengetahui jumlah BOG dalam bentuk volume Natural Gas, maka dilakukan konversi nilai dari volume LNG menjadi volume Natural Gas dalam satuan meter kubik normal.

$$V(NG) = V(LNG) \times \text{Expansion Ratio}$$



Gambar 6. P&ID MSO compressor.

Tabel 11.
Spesifikasi pipa

NPS	16
DN	400
Outside Diameter	406,4 mm
Thickness	4,19 mm
Inside Diameter	398,02 mm
Schedule	5S
Weight	41,56 kg/m
Material	Stainless Steel

Tabel 12.
Spesifikasi MSO kompresor

BOG Compressor	
Manufactured by	Burckhardt
Name	Laby GI Compressor
Type	LP250
Stages	4
Flowrate	10.000 kg/h
Outlet Pressure	100 bar
Suction Temperature	1450 psia
	(-170 to 45) °C (-274 to 113) °F
RPM	520
Power	4.000 kW 5.360 hp
Unit	1

Dimana: V(NG) = Volume Natural Gas (m³n)

V(LNG) = Volume LNG (m³)

Expansion Ratio = 568 m³n/m³liq

Dari Tabel 3 terlihat bahwa BOG pada FSRU memiliki nilai yang fluktuatif, dikarenakan kondisi operasional dari FSRU. Faktor yang menyebabkan terjadinya fluktuatif dikarenakan selama rentang satu tahun ada kondisi FSRU mengalami operasi *Hotel Mode* atau *Holding Mode* dimana tidak terjadi *loading – unloading* LNG atau proses regasifikasi *send – out* LNG dan *Loading - Unloading Mode* dimana terdapat LNG yang ditransfer atau adanya proses regasifikasi LNG untuk *send – out*. Kondisi BOG yang dihasilkan mengalami nilai tertinggi pada umumnya Ketika FSRU dalam kondisi tidak ada *send –out* atau disebut *Hotel Mode* dan dalam kondisi *unloading* pada nilai maksimum.

B. Konsumsi Boil Off Gas (BOG)

Penggunaan BOG pada FSRU diperuntukkan untuk peralatan Generator (DFDE), Boiler dan *Gas Combustion Unit* (GCU). Penggunaan GCU digunakan pada saat BOG mengalami sisa atau berlebih setelah digunakan untuk Generator dan Boiler.

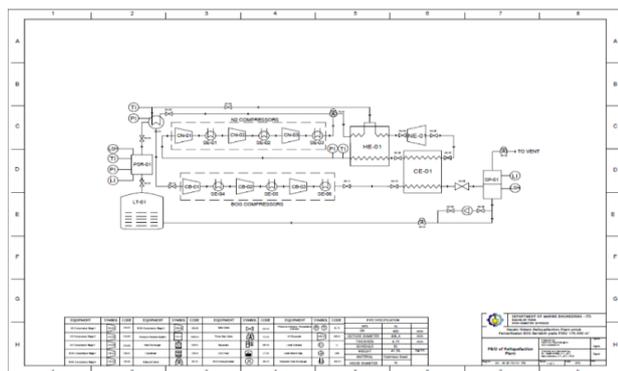
Dalam satu tahunnya nilai penggunaan BOG mengalami fluktuatif, hal itu disebabkan oleh kondisi operasional dari

Tabel 13.
Nilai BOG berlebih setelah penggunaan MSO kompresor

Kondisi	BOG Berlebih	BOG Berlebih (Setelah Penggunaan)
	m ³ n Gas	m ³ n Gas
Hotel Mode	87.624,65	68.905,74
Unloading Mode	47.148,53	28.429,62

Tabel 14.
Tipe *reliequfaction plant*

Variabel	Reliequfaction Plant	
	Mark III	EcoRel
Supplier	HGS	Cryostar
Operational Cycle	Brayton	Brayton
Refrigerant	N ₂	N ₂
Work. Pressure (bar)	58-14,5	47-9,5
Expansion Temp	(-163°C)	(-168°C)
BOG Cycle		
Compressor Type	Centrifuge	Centrifuge
N Compressor	3	2
Compress. Press	-	4,8 bar
Suction Temp	Room tem	(-120°C)
Observation	Intern. Refig sea water	Intern. Refig with N ₂
Capacity Liquefaction	7t/h	7 t/h
Power kW	1,94 kg/s	1,94 kg/s
	5.500	6.000



Gambar 7. P&ID *reliequfaction plant*.

FSRU tersebut. Jika FSRU pada kondisi *Hotel Mode* tentunya penggunaan BOG lebih sedikit dibandingkan jika dalam kondisi *Loading/Unloading Mode* karena kebutuhan peralatan yang dibutuhkan lebih banyak dan dengan bahan bakar yang lebih banyak dibandingkan kondisi *Hotel Mode*. Hal ini dijelaskan berdasarkan Gambar 1.

Umumnya kondisi *unloading* atau *send – out* LNG relatif jarang terjadi, dengan perkiraan sekali atau dua kali dalam seminggu tergantung permintaan. Berdasarkan proporsinya dapat dijelaskan pada Gambar 2.

C. Perhitungan BOG Berlebih

Setelah mengetahui nilai BOG yang dihasilkan dan konsumsi BOG, selanjutnya untuk dapat mengetahui teknologi yang tepat dalam pemanfaatan BOG yang berlebih diperlukan untuk mengetahui nilai daripada BOG berlebih tersebut.

Untuk menentukan nilai BOG berlebih didapatkan dari beberapa skenario yaitu ketika kondisi 0 mmscf (*Hotel Mode*), 0 – 100 mmscf (*low gas supply*), 100-200 mmscf (*normal gas supply*), lebih dari 200 mmscf (*max gas supply*). Hal itu dikarenakan kondisi konsumsi BOG yang berbeda – beda tergantung dari kondisi *send – out* LNG, sehingga dapat menentukan teknologi yang tepat pada penggunaannya, yang dijelaskan pada Tabel 4. Secara umum nilai BOG berlebih

Tabel 15.
Nilai BOG berlebih setelah penggunaan *Reliequfaction Plant*

Kondisi	BOG Berlebih	BOG Berlebih (Setelah Penggunaan)
	m ³ n Gas	m ³ n Gas
Hotel Mode	87.624,65	61.886,15
Unloading Mode	47.148,53	21.410,03

Tabel 16.
Analisis Ekonomi

Variabel	Satuan	<i>Reliequfaction Plant</i>	<i>MSO Compressor</i>
Waktu beroperasi	Hari	365	170
Pemasukan	US\$/Tahun	6.495.009	3.519.455
CAPEX	US\$	32.779.862	20.443.726
OPEX	US\$	561.000	280.500
NPV	US\$	26.400.911	11.905.921
PP		7 Tahun 2 Bulan	8 Tahun 2 bulan
IRR		13%	11%

Tabel 17.
Komparasi secara kuantitatif

Variabel	Satuan	<i>Reliequfaction Plant</i>	<i>MSO Compressor</i>
Kapasitas	kg/h	7.000	10.000
Daya	kW	5.500	4.000
Konsumsi Bahan Bakar	MMBTU/h	44,08	32,056
Dimensi (L x W x H)	m	25,6 x 7,9 x 8,6	13 x 7 x 5,2
Waktu beroperasi	Hari	365	170
Pemasukan	US\$/Tahun	6.495.009	3.519.455
CAPEX	US\$	32.779.862	20.443.726
OPEX	US\$	561.000	280.500
NPV	US\$	26.400.911	11.905.921
PP		7 Tahun 2 Bulan	8 Tahun 2 bulan
IRR		13%	11%

selama setahun pada tiap bulannya dapat dilihat berdasarkan Tabel 5.

D. Pemilihan Teknologi Minimum *Send – Out Compressor*

Teknologi *Minimum Send – Out Compressor* memanfaatkan BOG Kompresor yang akan disalurkan ke *send – out pipeline* bersama gas hasil regasifikasi dari FSRU. Penggunaan BOG Kompresor ini berfungsi untuk mengontrol tekanan dari gas agar sesuai dengan ketentuan.

1) Kapasitas BOG Kompresor

Berdasarkan Tabel 4 diketahui nilai BOG berlebih dari masing – masing kondisi operasi dalam satuan energi (MMBTU), untuk dapat mencari kompresor yang diinginkan diperlukan nilai mass flow dari BOG. Dalam menghitung nilai mass flow BOG yang digunakan adalah saat kondisi maksimal agar kompresor yang digunakan dapat digunakan pada setiap kondisi. yang dijelaskan pada Tabel 6.

2) Komposisi BOG

Dalam menentukan kompresor yang ingin dipakai diperlukan mengetahui komposisi BOG yang ada sebagai bahan pertimbangan dari penentuan kompresor yang dapat dilihat pada Tabel 7.

3) Pemilihan jenis kompresor

Selanjutnya untuk memilih kompresor dapat menggunakan grafik pemilihan kompresor pada Gambar 3 [4]. Berdasarkan Gambar 3 hasil yang didapatkan kompresor yang tepat untuk pemanfaatan BOG ini dapat menggunakan kompresor *reciprocating* atau sentrifugal. Karena volume BOG cukup besar dibandingkan dengan kapasitas kompresor BOG,

diperlukan kontrol dengan tipe berlangkah (step) sehingga mudah dalam menangani laju perubahan ini, dengan rentang kendali kapasitas besar diperlukan. Untuk kompresor *reciprocating*, suction valve unloader dengan clearance pocket memungkinkan berbagai range kontrol kapasitas. Kontrol kapasitas jenis berlangkah ini tersedia hingga lima langkah. Dengan cara ini, rentang kendali kapasitas yaitu (0 - 25% - 50% - 75% - 100%) yang disuplai oleh kompresor *reciprocating* [5].

Sedangkan sebagian besar kompresor sentrifugal, kisaran kontrol dibatasi (menurut desain) sekitar 80 - 100%, dan suhu gas masuk dan gravitasi spesifik tidak boleh bervariasi karena kompresor sentrifugal harus beroperasi pada kurva desainnya, dan hanya beroperasi setidaknya 10% di atas lonjakan atau titik daur ulang [5]. Selain itu, jika kondisi layanan bervariasi, kompresor *reciprocating* dapat melepaskan ke tekanan tinggi, terlepas dari volume BOG, tanpa persyaratan khusus untuk mengontrol suhu gas saluran masuk, atau menghindari operasi daur ulang seperti dengan kompresor sentrifugal. Oleh karena itu, desain kompresor *reciprocating* adalah kompresor yang paling cocok untuk digunakan untuk layanan BOG LNG untuk fasilitas penyimpanan LNG.

Kontrol kompresor *reciprocating* cukup sesuai dengan perubahan volume BOG, dan dengan demikian mengurangi biaya operasi keseluruhan, sehingga pada umumnya selalu dipakai untuk layanan BOG LNG di fasilitas penerimaan/penyimpanan LNG. Perbandingan antara kompresor

reciprocating dengan sentrifugal dijelaskan pada Tabel 8. Selanjutnya untuk *material* yang digunakan pada kompresor *reciprocating* ini adalah *carbon steel* [6].

4) Penentuan jumlah stages

Selanjutnya perlu untuk menentukan jumlah stage dari kompresor *reciprocating*. Dikarenakan ketentuan *pressure suction* dan *pressure discharge* memiliki rentang yang sangat jauh. Perhitungan untuk menentukan jumlah stage sebagai berikut.

$$r = \sqrt[N]{\frac{P_{out}}{P_{in}}}$$

Dimana: r = Compression ratio
 N = Stage
 P_{out} = Pressure Out
 P_{in} = Pressure In

Dengan ketentuan *compression ratio* untuk kompresor *reciprocating* adalah 3,0 – 4,0 [4], atau dengan nilai dibawah 4,0 [7]. Sebagai asumsi menggunakan 4 stages. Nilai r sebesar 2,958 mendekati nilai 3 dan dibawah nilai 4 sehingga sesuai dengan ketentuan yang ada. Jika jumlah stage diturunkan menjadi 3 stages nilai r nya menjadi 4,246 dimana diluar ketentuan yang ada. Sehingga kompresor ini menggunakan 4 stages.

5) Perhitungan tekanan tiap stages

Selanjutnya menghitung nilai tekanan *suction* dan *discharge* pada tiap stage kompresor. Pada kompresor *multistage* terdapat *pressure drop* pada tiap aliran stagenya, nilai *pressure drop* pada kompresor ini adalah 0,19 bar dan 0,2 bar pada tekanan tinggi dan rendah [8]. Perhitungan tiap stagenya seperti pada Tabel 9

6) Simulasi Aspen HYSYS

Berdasarkan data yang sudah ada yaitu komposisi BOG, *suction temperature*, *suction pressure*, *discharge pressure* dan *mass flow*. Menggunakan Aspen HYSYS untuk mendapatkan nilai *discharge temperature*, *molar flow* dan *liqvol*. Kompresor ini menggunakan *multistage* sehingga diperlukan adanya *intercooler* dengan adanya *intercooler* hasil *discharge temperature* dapat memiliki nilai yang lebih kecil sesuai dengan kondisi pada *send-out pipeline*.

7) Kesimpulan desain kompresor

Kesimpulan desain BOG kompresor dapat dilihat pada Tabel 10.

8) P&ID MSO Compressor

P&ID MSO compressor dapat dilihat pada Gambar 6.

9) Desain pipa

Dalam proses mendesain sistem diperlukan untuk mengetahui pipa yang akan digunakan. Diameter pipa yang dibutuhkan dalam sistem sebagai berikut.

$$dh = \sqrt{\frac{4Q}{\pi xv}}$$

Dimana: dh = Diameter minimum

Q = Flowrate (m³/s)

v = Kecepatan dari fluida (*natural gas*) (m/s)

Berdasarkan DNV GL *Part 5 Chapter 7 Section 6 4.1.2* Tabel 4 pada suhu operasi -165°C material pipa yang digunakan adalah 9% *nickel steel*, *austenitic steels*, *aluminium alloys*. Untuk pipa yang digunakan berdasarkan ASME B36.19M.

10) Pemilihan MSO Kompresor

Berdasarkan perhitungan sebelumnya kompresor yang paling tepat dan sesuai dengan spesifikasi desain yang sudah ada adalah sesuai dengan Tabel 12.

11) Nilai BOG berlebih setelah penggunaan MSO kompresor

Setelah mengetahui MSO kompresor yang akan digunakan diperlukan untuk mengetahui konsumsi bahan bakar gas, berdasarkan Tabel 2 dan *Project Guide Generator* Wartsila 6L50DF yang digunakan oleh FSRU.

Setelah mengetahui konsumsi bahan bakar gas MSO kompresor yang dalam hal ini menggunakan BOG, perlu diketahui nilai BOG berlebih setelah instalasi MSO kompresor. Nilai BOG berlebih diklasifikasikan berdasarkan kondisi operasional FSRU seperti pada Tabel 13.

12) Operasional MSO kompresor

Prinsip kerja dari sistem MSO *compressor* adalah memanfaatkan BOG berlebih dengan mendistribusikannya menggunakan BOG kompresor untuk diarahkan langsung menuju konsumen, melalui *send-out pipeline*, sehingga sistem ini dapat melakukan gas *send-out* secara mandiri diluar sistem regasifikasi yang ada, tetapi tidak adanya proses regasifikasi dikarenakan tidak ada demand, sehingga pemanfaatan BOG berlebih menjadi tidak maksimal. Namun, penggunaan MSO *compressor*, BOG dapat tersimpan pada *linepack pipeline*. Untuk mengetahui besaran volume BOG berlebih yang dapat dimanfaatkan ketika kondisi *Hotel Mode*

jika menggunakan MSO compressor adalah dengan mengetahui volume pipa sebelum memasuki *Onshore Receiving Facility* (ORF).

Berdasarkan perhitungan, volume dari *pipeline* sebesar 5.511,19 m³ dimana nilai tersebut dijadikan batas kapasitas volume BOG yang dapat ditampung ketika menggunakan MSO compressor pada kondisi *Hotel Mode*. Selanjutnya nilai BOG berlebih yang dapat dimanfaatkan setelah dikurangi penggunaan MSO compressor pada *Hotel Mode* sebesar 68.905,74 m³/d per harinya, sehingga penggunaan MSO compressor dapat dilaksanakan secara maksimal selama 2 jam pada *Hotel Mode*.

E. Pemilihan Teknologi Reliquefaction Plant

Metode lain untuk memanfaatkan BOG berlebih dapat dengan mencairkan kembali dan mengembalikannya ke tangki – tangki muatan yang disebut dengan *reliquefaction*. Penggunaan *reliquefaction* ini juga ditujukan agar komposisi LNG tetap identik sepanjang waktu sehingga terhindar dari fenomena LNG *ageing* yang sering terjadi.

Kapasitas *reliquefaction plant* yang dibutuhkan dapat dilihat dari nilai BOG berlebih yang dihasilkan pada kondisi maksimal yang pada kondisi *Hotel Mode* sebesar 6.730,86 kg/h dan kondisi *Unloading Mode* tertinggi adalah 6.231,97 kg/h.

Teknologi yang digunakan pada *reliquefaction plant* ini adalah menggunakan *Brayton Cooling Cycle* dengan N₂ sebagai fluida kerja pendingin. Penggunaan *reliquefaction plant* membutuhkan *gas combustion unit* (GCU) yang diperuntukkan sebagai *backup* atau alternatif dari *reliquefaction plant* yang berfungsi membuang nilai BOG dari *cargo tanks*. GCU sudah terdapat pada FSRU ini.

1) Tipe Reliquefaction Plan

Berdasarkan implementasi yang sudah ada di FSRU pada umumnya ada beberapa sistem *reliquefaction plant* dijelaskan pada Tabel 14.

Penggunaan *Brayton Cycle reliquefaction* memiliki konsumsi energi yang tinggi, namun tipe ini dicirikan dengan kekompakannya dan kekokohnya, sederhana dan sedikit penggunaan peralatan tambahan. Tujuannya untuk mengurangi kebutuhan daya terkait dengan kebutuhan meningkatkan kemampuan *reliquefaction* yang pada umumnya membutuhkan sistem yang lebih kompleks dan penggunaan peralatan tambahan yang lebih banyak.

Pada FSRU penggunaan HGS Mark III *reliquefaction* dirasa paling tepat karena dari kapasitas mencukupi, namun memiliki daya yang lebih rendah.

2) P&ID Reliquefaction Plant

P&ID Reliquefaction plant dapat dilihat pada Gambar 7.

3) Desain pipa

Desain pipa yang dibutuhkan dikarenakan nilai *flowrate* yang sama dengan kebutuhan di MSO compressor maka memiliki spesifikasi yang sama seperti pada Tabel 9.

4) Nilai BOG berlebih setelah penggunaan Reliquefaction Plant

Setelah mengetahui *reliquefaction plant* yang akan digunakan diperlukan untuk mengetahui konsumsi bahan bakar gas, berdasarkan Tabel 2 dan *Project Guide Generator*

Wartsila 6L50DF yang digunakan oleh FSRU. Sama seperti MSO compressor, setelah mengetahui konsumsi bahan bakar gas dari *reliquefaction plant*, perlu diketahui nilai BOG berlebih setelah instalasi sistem tersebut. Nilai BOG berlebih diklasifikasikan berdasarkan kondisi operasional FSRU seperti pada Tabel 15.

5) Operasional Reliquefaction Plant

Berdasarkan kondisi operasional yang ada pada FSRU, penggunaan *reliquefaction plant* ini tidak terpengaruh kondisi operasional yang ada, dikarenakan sistem ini dapat terus berlangsung secara fungsinya. Sehingga penggunaan *reliquefaction plant* sangat sesuai untuk skala jangka Panjang. Kekurangan dari penggunaan *reliquefaction plant* adalah sistem yang kompleks, dan memerlukan *refrigerant* sebagai pendinginannya.

F. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi yang dilakukan pada penelitian ini hanya mencakup biaya investasi dan biaya operasional yang dibutuhkan pada penggunaan teknologi pemanfaatan BOG, yang dalam hal ini yaitu MSO compressor dan *reliquefaction plant* dan melakukan perhitungan kelayakan apakah sistem tersebut layak untuk diinstalasi pada FSRU berdasarkan NPV, IRR dan PP selama masa guna alat 20 tahun. Analisis ekonomi berfungsi sebagai *preliminary study* yang berdasar *AACE International (Association for the Advancement of Cost Engineering)* mengacu pada kelas 4.

Analisis ekonomi ini menggunakan asumsi keekonomian kurs USD sebesar Rp 14.500, harga gas US\$ 10,08/MMBTU berdasarkan *Indexmundi (Indonesia LNG)*, eskalasi OPEX 2% berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 58 Tahun 2017. Hasil dari analisis ekonomi dijelaskan pada Tabel 16

Kedua sistem dapat dikatakan layak dikarenakan nilai NPV lebih dari nol (0), dan nilai IRR yang lebih besar dari nilai suku bunga (*discount rate*) sebesar 4,5% yang berasal dari suku bunga repo Bank Indonesia.

G. Studi Komparasi

Setelah melakukan analisis secara teknis dan ekonomi, berikut komparasi antara penggunaan teknologi *reliquefaction plant* dengan MSO compressor, secara kuantitatif dan kualitatif.

1) Komparasi kuantitatif

Komparasi secara kuantitatif dapat dilihat pada Tabel 17.

2) Komparasi kualitatif

Selain komparasi secara kuantitatif berdasarkan Tabel 17, diperlukan mengkomparasi secara kualitatif. Pertama, untuk MSO compressor sebagai berikut: (a) Dapat melakukan gas *send-out* secara mandiri; (b) Cocok dalam kondisi *minimum send-out* dikarenakan kontrol kompresor yang fleksibel; (c) Kurang sesuai dalam operasi yang dimana sering terjadi *zero send-out (Hotel Mode)*; (d) Memiliki sistem yang sederhana. Selanjutnya untuk *reliquefaction plant* sebagai berikut: (a) Memiliki sistem yang kompleks; (b) Memerlukan beberapa peralatan dan utilitas tambahan seperti *refrigerant* dalam bentuk nitrogen, air laut, dan lain – lain; (c) Sesuai pada penggunaan jangka panjang, tidak bergantung pada kondisi operasional FSRU.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan, analisis, serta pembahasan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut. (1)FSRU ini memiliki nilai rata – rata perharinya untuk volume muatan LNG sebesar 68.649,55 m³, nilai BOG sebesar 163,23 m³LNG atau 92.714,94 m³n Gas dan *boil off rate* 0,237%; (2)Nilai rata – rata nilai BOG berlebih perharinya sebesar 2.823,184 MMBTU. Nilai BOG berlebih memiliki nilai yang fluktuatif karena bergantung kondisi operasional FSRU; (3)Perancangan MSO *compressor* menghasilkan bahwa membutuhkan BOG kompresor yang memiliki tipe *reciprocating* dengan 4 *stages*, berbahan *carbon steel*, *suction pressure* 100 kPa, *discharge pressure* 7.653 kPa, suhu *suction* -160 °C, suhu *discharge* 129,1°C, dengan kapasitas pada kondisi Hotel Mode sebesar 6.730,856 kg/h dan kondisi Unloading Mode adalah 62.331,967 kg/h. Dalam pemilihannya menggunakan BOG kompresor dari Burckhard Laby GI *Compressor* LP250 4 *stages*, kapasitas 10.000 kg/h, daya 4.000 kW, dan konsumsi bahan bakar 32,056 MMBTU/h; (4)Perancangan *reliequfaction plant* berdasarkan prinsip operasi siklus pendinginan Brayton, yang memiliki kapasitas pada kondisi *hotel mode* sebesar 6.730,86 kg/h dan kondisi *unloading mode* adalah 6.231,97 kg/h. Dalam pemilihannya menggunakan *reliequfaction plant* Wartsila HGS Mark III, yang menggunakan siklus kerja *inverse Brayton*, berkapasitas 7.000 kg/h, daya 5.500 kW, dan konsumsi bahan bakar 44,08 MMBTU/h; (5)Berdasarkan analisis ekonomi, MSO *compressor* memiliki nilai NPV US\$ 11.905.921, IRR 11% dan PP selama 8 tahun 2 bulan. Sedangkan *reliequfaction plant* memiliki nilai NPV US\$

26.400.911, IRR 13% dan PP selama 7 tahun 2 bulan; (6)Rekomendasi pemanfaatan BOG berlebih pada FSRU berdasarkan aspek teknis kondisi FSRU yang lebih sering mengalami kondisi *hotel mode* dianjurkan lebih baik menggunakan *reliequfaction plant* dikarenakan dapat digunakan dalam jangka panjang. Berdasarkan aspek ekonomis penggunaan MSO *compressor* memiliki nilai CAPEX dan OPEX lebih rendah, tetapi secara nilai NPV, IRR dan PP penggunaan *reliequfaction plant* memiliki nilai lebih baik karena sesuai dengan penggunaan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. E. dan S. D. M. R. Indonesia, *Neraca Gas Bumi Indonesia*. Jakarta: Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2018.
- [2] B. Songhurst, "The outlook for floating storage and regasification units (frsus)," *Minerva Urol.*, vol. 12, no. July, pp. 1–54, 2017.
- [3] I. G. Union, "Natural Gas Conversion Guide," 2012, [Online]. Available: http://agnatural.pt/documentos/ver/natural-gas-conversion-guide_cb4f0ccd80ccaf88ca5ec336a38600867db5aaf1.pdf.
- [4] H. Silla, *Chemical Process Engineering: Design And Economics*. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [5] N. Akamo, "Process critical compressors." 2006, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/294455577_Process_critical_compressors.
- [6] G. Ulrich, "A guide to chemical engineering process design and economics. John Wiley&Sons," *Inc., New York*, 1984.
- [7] S. Mokhtab, W. A. Poe, and J. Y. Mak, *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices: Third Edition*, 3rd ed. Oxford: Elsevier Inc., 2015.
- [8] S. K. Kochunni, P. Ghosh, and K. Chowdhury, "Optimization of UA of heat exchangers and BOG compressor exit pressure of LNG boil-off gas *reliequfaction* system using exergy analysis," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 101, no. 1, 2015, doi: 10.1088/1757-899X/101/1/012090.