



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SKRIPSI – ME184834

**PENENTUAN ARMADA DAN RUTE OPTIMAL *LNG CARRIER*
UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN GAS ALAM PADA
PEMBANGKIT DENGAN PENDEKATAN *GREEN-SHIP ROUTING*
*PROBLEM***

Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
NRP 0421164000044

Dosen Pembimbing
A.A.B. Dinariyana Dwi P., S.T., MES. Ph.D.
Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

SKRIPSI - ME 184834

**PENENTUAN ARMADA DAN RUTE OPTIMAL LNG CARRIER
UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN GAS ALAM PADA
PEMBANGKIT DENGAN PENDEKATAN GREEN-SHIP ROUTING
PROBLEM**

Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
NRP 0421164000044

Dosen Pembimbing
A.A.B. Dinariyana D.P., S.T., MES. Ph.D.
Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SKRIPSI - ME 184834

DETERMINING OPTIMAL FLEETS AND ROUTES OF LNG CARRIERS TO SATISFY NATURAL GAS DEMAND IN POWER PLANTS USING GREEN-SHIP ROUTING PROBLEM APPROACH

Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
NRP 0421164000044

Supervisors
A.A.B. Dinariyana D.P., S.T., MES., Ph.D.
Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PENENTUAN ARMADA DAN RUTE OPTIMAL LNG CARRIER UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN GAS ALAM PADA PEMBANGKIT DENGAN PENDEKATAN *GREEN-SHIP ROUTING PROBLEM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi *Reliability, Availability, Management
and Safety (RAMS)*
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh :

JOSHUA JONATHAN ALFONSO SIAHAAN

NRP. 0421164000044

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

A. A. B. Dinariyana D. P., S.T., MES., Ph.D.

()

Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

()

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PENENTUAN ARMADA DAN RUTE OPTIMAL LNG CARRIER UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN GAS ALAM PADA PEMBANGKIT DENGAN PENDEKATAN *GREEN-SHIP ROUTING PROBLEM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi *Reliability, Availability, Management
and Safety (RAMS)*
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh :

JOSHUA JONATHAN ALFONSO SIAHAAN

NRP. 0421164000044



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Penentuan Armada dan Rute Optimal LNG Carrier untuk Pemenuhan Kebutuhan Gas Alam pada Pembangkit dengan Pendekatan Green-Ship Routing Problem

Nama Mahasiswa : Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
NRP : 0421164000044
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan ITS
Dosen Pembimbing 1 : A.A.B. Dinariyana D.P., S.T., MES., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

Abstrak

Gas alam didistribusikan di seluruh Indonesia terutama untuk digunakan sebagai bahan bakar di pembangkit listrik. Peningkatan konsumsi listrik di Indonesia rata-rata adalah sekitar 6,8% setiap tahunnya. Sebagai tanggapan, pemerintah mempertimbangkan pengembangan pembangkit listrik gas di bagian tengah Indonesia. Sebagai negara kepulauan, Indonesia sangat bergantung pada konektivitas antar pulau yang ditopang oleh kapal laut. Distribusi LNG dengan kapal dapat dirancang dalam bentuk model transportasi *hub and spokes*. *Hub and spokes* terdiri dari satu pelabuhan *hub* dan beberapa pelabuhan *feeder*. Dalam jaringan transportasi ini, *hub* diwakilkan oleh fasilitas pencairan gas alam sedangkan *spokes* adalah terminal penerima pada masing-masing titik tujuan. Untuk memanfaatkan armada secara optimal, dilakukan metode optimasi. Selain minimasi biaya, ada pertimbangan lain dalam mengoptimalkan armada. Salah satu pertimbangan yang menjadi tren saat ini adalah emisi. Dalam beberapa tahun terakhir, kepedulian terhadap lingkungan semakin meningkat. IMO merilis penelitian yang menunjukkan bahwa transportasi laut memiliki kontribusi 2,7% untuk emisi antropogenik global. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan armada dan rute pengiriman LNG yang optimal untuk meminimalkan emisi CO₂ yang menjadi bagian dari biaya distribusi LNG di bagian tengah Indonesia yang meliputi Sulawesi Tenggara, Kepulauan Maluku Selatan, dan Nusa Tenggara Timur Kepulauan. Perhitungan biaya dilakukan dalam kerangka kerja G-VRP yang memperhitungkan emisi. Metode yang disebut *Bin Packing Problem* dalam konteks *Vehicle Routing Problem* digunakan untuk meminimalkan total biaya distribusi dan emisi untuk setiap cluster. Setelah mendapatkan opsi rute dan armada optimal, penelitian ini menghitung pengurangan biaya menggunakan LNG sebagai bahan bakar utama kapal. Hasil optimasi ini menunjukkan bahwa transportasi dilakukan dengan menggunakan satu unit kapal tipe-A, sembilan unit kapal tipe-B, dan satu unit kapal tipe-C. Semua kapal menggunakan LNG sebagai bahan bakar. Total biaya untuk skenario ini adalah \$ 13.298.112,25 dan penggunaan motor diesel

bahan bakar ganda alih-alih mesin diesel konvensional untuk kapal-kapal dapat mengurangi total biaya sebesar \$ 10.343.486,53 atau 43,75%.

Kata kunci : Emisi, Green-Ship Routing Problem, LNG, Optimasi Armada, Bin Packing Problem

Determining Optimum Fleets and Routes of LNG Carriers to Satisfy Natural Gas Demand in Power Plants Using Green-Ship Routing Problem Approach

Nama Mahasiswa : Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
NRP : 0421164000044
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan ITS
Dosen Pembimbing 1 : A.A.B. Dinariyana D.P., S.T., MES., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Emmy Pratiwi, S.T.

Abstrak

Natural gas is distributed around Indonesia mainly to be used as fuel in electrical power plants. The increase of consumption of electricity in Indonesia is on average of 6.8% annually. In response, the government considers developing gas power plants in central parts of Indonesia. As an archipelago, Indonesia depends heavily in connectivity between islands which is obviously supported by seaborne vessels or ships. These facts make the LNG transportation a complex matter in Indonesia. The distribution of LNG by ship can be designed as a hub and spokes liner shipping. A single hub and spokes network has one hub port and several feeder ports. In this transportation network, the hub is the liquefaction plant and the feeder ports are receiving terminals. Various optimization methods have been established to optimally utilize a fleet. Other than the cost-efficiency, there are other considerations in optimizing the fleet. One of the current trending considerations is the emission. In the past few years, concern about environment has been increasing. IMO released a number based on research that shows that maritime transportation has 2.7% contribution to global anthropogenic emission. The aim of this research is to determine the optimal fleet and its routes of an LNG shipping to minimize the CO₂ emission while also minimizing the cost of LNG distribution in central part of Indonesia that covers South Eastern Sulawesi, Southern Maluku Islands, and East Nusa Tenggara Islands. The cost calculation was done in a G-VRP framework which took emission into account. A method called Bin Packing Problem within the context of Vehicle Routing Problem was established to minimize the total distribution cost and emission for each cluster. After acquiring the best route and fleet option, this research calculate the cost reduction of using LNG as the ship's main fuel. The result of this optimization study showed that the transportation shall use one unit of type-A ships, nine units of type-B ships, and one unit of type-C ship. All ships use LNG as fuel. The total expense for this scenario is \$ 13.298.112,25 and the use of dual fuel diesel engine instead of a conventional diesel engine for the ships can reduce the total costs by \$ 10.343.486,53 or 43,75%.

Keywords: Emission, Green-Ship Routing Problem, LNG, Fleet Optimization, Bin Packing Problem

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Terimakasih kepada Tuhan yang maha esa yang oleh berkatnya penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir berjudul “Penentuan Armada dan Rute Optimal LNG Carrier untuk Pemenuhan Kebutuhan Gas Alam pada Pembangkit dengan Pendekatan *Green-Ship Routing Problem*” ini. Tugas akhir ini dibuat untuk memenuhi syarat kelulusan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Selama pengerjaan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karenanya, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Tuhan yang maha esa yang sudah memberikan berkat selama pengerjaan hingga puji Tuhan dapat selesai.
2. Demi Asitorang Siahaan sebagai ayah, Lisa Andayani sebagai ibu, dan Ester Theomonica Astrid Siahaan sebagai adik yang selalu mendukung secara emosional, spiritual, dan finansial.
3. Beny Cahyono, S.T., M.Sc., PhD selaku kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan (DTSP), Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan sekaligus dosen wali penulis yang sudah mendukung studi penulis sejak semester satu.
4. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc. selaku kepala lab RAMS yang selalu menjadi inspirasi sejak penulis menjadi member di lab RAMS.
5. A.A. Bagus Dinariyana Dwi P., S.T., M.ES., Ph.D. dan Dr. Emmy Pratiwi, S.T. selaku dosen pembimbing penulis yang selalu memberikan dukungan, masukan yang membuat tugas akhir ini dapat diselesaikan.
6. Keluarga kontrakan city home regency dan KTT-BME yaitu Taufiq, Pius, Reyhan, Renaldy, Gita, dan Nina yang selalu memberi dukungan emosional selama pengerjaan.
7. Seluruh member Team Chicken yang sangat solid Jeff, Daniel, Lucky, Bob, dan Kesul yang berperan membebaskan penulis dari stress selama pengerjaan.
8. Seluruh teman-teman Rofhty Pro yaitu Jovaldi, Timothy, Apen, Kesul, Lucky, Bill, Jober, dan Michael yang selalu saling mendukung.
9. Seluruh teman-teman mahasiswa, alumni, maupun dosen di lab RAMS.
10. Seluruh teman-teman angkatan Voyage 2016 untuk semua dukungannya.
11. Meisyee Monique sebagai sahabat yang selalu memberi penulis dukungan dari jauh.
12. Lazarus Cameo / Nadhila sebagai ‘go to artist’ yang selalu sedia mendengar keluh-kesah dan menemani penulis setahun terakhir.
13. Seluruh pihak yang idak dapat penulis sebut satu-persatu.

Bekasi, Juli 2020

Joshua Jonathan Alfonso Siahaan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Liquefied Natural Gas (LNG).....	5
2.2. Gas Alam di Indonesia	6
2.3. Rantai Pasok LNG.....	9
2.4. Komponen LNG Supply Chain	11
2.5. Data PLTMG di Cluster Nusa Tenggara.....	13
2.6. Data PLTMG Cluster Sulbagtra	14
2.7. Data PLTMG Cluster Maluku Selatan.....	16
2.8. Pola Operasi Pelayaran	17
2.9. Definisi dan Jenis Biaya	18
2.10. Green House Effect dan CO ₂	19
2.11. Marginal Damage Cost (MDC).....	20
2.12. Optimasi	22
2.13. Linear Programming dan Integer Linear Programming.....	22
2.14. Jenis-jenis jaringan transportasi	23
2.15. Abadi Gas Field dan LNG Masela	24
2.16. Bin Packing Problem (BPP).....	25
2.17. Vehicle Routing Problem dan Set Partitioning Problem.....	27
2.18. Green Ship Routing Problem (G-SRP).....	29
2.19. LNG Sebagai Bahan Bakar Kapal.....	30
BAB III METODE PENELITIAN	33

3.1. Flowchart Pengerjaan.....	33
3.2. Identifikasi Masalah	34
3.3. Menentukan Obyek Penelitian	35
3.4. Studi Literatur	35
3.5. Pengumpulan Data	35
3.6. Klasterisasi Wilayah Kajian.....	35
a. Pembentukan Rute, TSP, dan Perhitungan Biaya	36
3.7. Optimasi Rute Dengan G-SRP menggunakan Bin Packing Problem	36
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Klasterisasi Obyek Jaringan Distribusi.....	39
4.2 Kapasitas PLTMG dan Perhitungan Demand.....	42
4.3 Data Lokasi PLTMG dan Klasterisasi	44
4.4 Matriks Jarak	49
4.5 Screening alternatif LNG carriers	51
4.6 Model Operasional Kapal.....	54
4.7 Komponen Biaya	55
4.8 Cluster Routes Generation: Sulawesi Tenggara.....	63
4.9 Cluster Routes Generation: Nusa Tenggara.....	65
4.10 Cluster Routes Generation: Maluku.....	66
4.11 Optimasi akhir dengan formulasi Bin Packing Problem.....	66
4.12 Hasil Optimasi	67
4.13 Pembahasan	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.1 Saran	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN	77
Biografi Penulis	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sebaran sumber Gas Alam Indonesia	1
Gambar 2.1 Kapal pengangkut LNG	5
Gambar 2.2 Pengekspor LNG terbesar dunia tahun 2012	6
Gambar 2.3 Produksi dan Kebutuhan gas Domestik Indonesia.....	6
Gambar 2.4 Profil Produksi Migas Indonesia.....	8
Gambar 2.5 Cadangan Gas Alam Indonesia.....	9
Gambar 2.6 LNG <i>Volumetric Efficiency</i>	10
Gambar 2.7 LNG <i>Supply Chain</i>	11
Gambar 2.8 LNG <i>Plant</i> Tangguh.....	12
Gambar 2.9 Peta Wilayah Nusa Tenggara	13
Gambar 2.10 Pembangkit di Pulau Timor.....	14
Gambar 2.11 PLTMG Kendari dan Bau-Bau	15
Gambar 2.12 Lokasi PLTMG Selayar dan Selayar 2.....	15
Gambar 2.13 Peta Sebagian Wilayah Maluku	16
Gambar 2.14 Pembangkit di Kepulauan Maluku (RPTUL PLN).....	16
Gambar 2.15 Pola Pelayaran <i>Liner</i>	18
Gambar 2.16 Visualisasi Efek Rumah Kaca	19
Gambar 2.17 Estimasi <i>Marginal Damage Cost</i> USD per Ton Karbon.....	21
Gambar 2.18 <i>Point to Point Network</i>	23
Gambar 2.19 Jaringan <i>Hub and Spoke</i>	24
Gambar 2.20 Lokasi Cadangan Gas Alam di Masela	25
Gambar 2.21 Aplikasi <i>Bin Packing Problem</i>	26
Gambar 2.22 <i>VRP</i> vs <i>TSP</i>	27
Gambar 2.23 Paper per tahun dengan tema <i>VRP</i>	28
Gambar 2.24 Penurunan Emisi Dengan Bahan Bakar LNG pada Kapal	30
Gambar 3. 1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir.....	34
Gambar 3. 2 Contoh <i>Spreadsheet Model Bin Packing Problem</i> Sederhana untuk <i>VRP</i>	37
Gambar 4.1 Lokasi <i>On-Shore Storage</i>	39
Gambar 4.2 Lokasi <i>hub</i> distribusi	40
Gambar 4.3 Zonasi wilayah pembangkit.....	40
Gambar 4.4 Titik-titik demand yang akan dilayani	41
Gambar 4.5 Klasterisasi Wilayah Kajian Berdasarkan RUPTL PLN	41
Gambar 4.6 Sebaran Pembangkit di Wilayah Sulawesi Tenggara.....	45
Gambar 4.7 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Selayar.....	45
Gambar 4.8 Sebaran Pembangkit di Wilayah Ambon dan Seram	46
Gambar 4.9 Sebaran Pembangkit di Wilayah Langgur-Dobo	46
Gambar 4.10 Sebaran Pembangkit di Wilayah Yamdena-Masela	47
Gambar 4.11 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Buru.....	47
Gambar 4.12 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Flores.....	48
Gambar 4.13 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Sumba.....	48
Gambar 4.14 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Timor	49

Gambar 4.15 Tinggi gelombang perairan wilayah pelayaran.....	53
Gambar 4.16 Model operasional kapal pada armada	54
Gambar 4.18 Hasil <i>Routing</i> untuk <i>Cluster</i> 1	68
Gambar 4.19 Hasil <i>Routing</i> untuk <i>Cluster</i> 2	69
Gambar 4.20 Hasil <i>Routing</i> untuk <i>Cluster</i> 3	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Emisi Gas Rumah Kaca Maritim.....	2
Tabel 2.1 Rencana pembagian sumber energi listrik PLN	7
Tabel 2.2 Kilang produksi LNG di Indonesia dan Statusnya	7
Tabel 2.3 Klasifikasi ukuran kapal LNG.....	12
Tabel 2.4 Rincian Kapasitas Pembangkit di <i>Cluster</i> Nusa Tenggara	14
Tabel 2.5 Rincian Kapasitas Pembangkit di <i>Cluster</i> Sulbagtra	15
Tabel 2.6 Rincian Kapasitas Pembangkit di <i>Cluster</i> Maluku.....	17
Tabel 2.7 <i>Carbon Factor on Various Types of Fuels</i>	31
Tabel 4.1 Perhitungan Kebutuhan Gas PLTMG.....	43
Tabel 4.2 Perhitungan Kebutuhan Gas PLTMG (lanjutan)	44
Tabel 4.3 Matriks Jarak Cluster Maluku dalam km	49
Tabel 4.4 Matriks Jarak Cluster Sulawesi Tenggara dalam km.....	50
Tabel 4.5 Matriks Jarak Cluster NTT	51
Tabel 4.6 Batas aman tinggi gelombang masing-masing tipe kapal	52
Tabel 4.7 Kategori dan tinggi gelombang di wilayah pelayaran	52
Tabel 4.8 Tabel Nilai Statistika MDC (\$/ton)	55
Tabel 4.9 <i>Carbon Factor</i> bahan bakar	56
Tabel 4.10 Referensi biaya bahan bakar	57
Tabel 4.11 Data Pembandingan Konsumsi Bahan Bakar mesin <i>Dual Fuel</i>	58
Tabel 4.12 Biaya Operasional Pelabuhan (Kemenhub)	59
Tabel 4.13 Kebutuhan Jetty <i>Cluster</i> Sulbagtra	60
Tabel 4.4 Kebutuhan Jetty <i>Cluster</i> NTT	60
Tabel 4.15 Kebutuhan Jetty <i>Cluster</i> Maluku	61
Tabel 4.16 Beberapa hasil perhitungan EAC pada <i>cluster</i> 3	62
Tabel 4.17 Data Kapal Pembandingan	62
Tabel 4.18 <i>Possible Routes</i> Cluster Sulawesi Tenggara	63
Tabel 4.19 Hasil TSP Masing-Masing Jarak <i>Cluster</i> Sulbagtra	64
Tabel 4.20 Sebagian Hasil TSP Masing-Masing <i>Subset</i> di <i>Cluster</i> Nusa Tenggara. 65	
Tabel 4.21 Sebagian Hasil TSP Masing-Masing <i>Subset</i> di <i>Cluster</i> Nusa Tenggara. 66	
Tabel 4.22 Hasil Optimasi Cluster 1	67
Tabel 4.23 Hasil Optimasi Cluster 2	68
Tabel 4.24 Hasil Optimasi Cluster 3	69

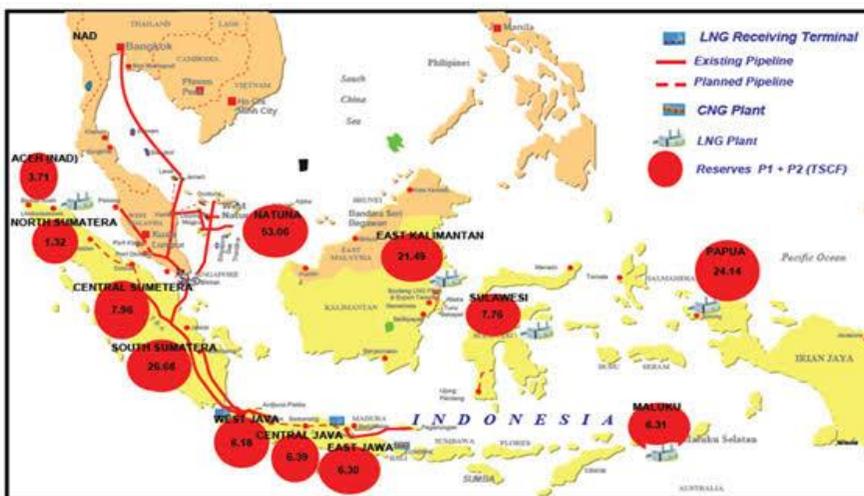
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan dengan jumlah pulau yang tercatat sebanyak 17.504 pulau yang tersebar dari Sabang sampai Merauke. Sebagai negara kepulauan, Indonesia sangat bergantung terhadap konektivitas antar pulau yang ditunjang oleh transportasi laut yaitu kapal. Kapal sebagai media distribusi komoditas merupakan bagian vital dalam pertumbuhan ekonomi negara. Salah satu komoditas yang didistribusikan adalah gas alam (*natural gas*).

Indonesia memiliki persediaan gas alam yang relatif besar. Titik-titik seperti laut Natuna, Masela, Kalimantan Timur, dan lain-lain memiliki cadangan gas alam yang sangat besar yang mencapai 99,77 TCF dan cadangan potensial tambahan sebanyak 50,21 TCF (Migas, 2013). Meskipun demikian, separuh dari gas alam yang ada di Indonesia masih diekspor ke luar negeri yang menjadikan Indonesia sebagai salah satu Negara pengekspor gas alam terbesar di dunia.



Gambar 1.1 Sebaran sumber Gas Alam Indonesia
(Sumber: Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2018)

Salah satu pemanfaatan gas alam adalah sebagai bahan bakar di Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG). Pemerintah telah menetapkan akan meningkatkan konsumsi domestik gas alam dengan berbagai upaya. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan membuat sasaran pada Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) yang disusun oleh BUMN Indonesia yaitu Perusahaan Listrik Negara (PLN).

Konsumsi listrik Negara mengalami peningkatan per tahun mencapai 6.8% per tahun (BPPT, 2016). Pertumbuhan konsumsi listrik tersebut diprediksi akan terus bertambah. Oleh karena itu, kapasitas pembangkit listrik harus ditingkatkan. Untuk itu, pemerintah berencana akan membangun pembangkit-pembangkit listrik dengan tenaga gas alam di berbagai wilayah di penjuru Indonesia.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, gas alam harus didistribusikan ke berbagai PLTMG di seluruh penjuru Indonesia. Distribusi gas alam dilakukan dengan mencairkan gas alam tersebut agar memiliki volume yang lebih kecil. Gas alam yang dicairkan ini disebut LNG. LNG didistribusikan menggunakan kapal, pipa, dan truk. Untuk jarak menengah, kapal adalah moda transportasi yang paling efisien. Oleh karena itu, harus direncanakan sebuah model distribusi menggunakan *LNG carrier* yang optimal.

Sebagaimana telah dikeluarkannya Undang-Undang No.16 Tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement*, RUPTL harus mendukung upaya komitmen Pemerintah dalam menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% pada tahun 2030 dengan PLN merupakan bagian dari komitmen tersebut.

Tabel 1.1 Emisi Gas Rumah Kaca Maritim

	Third IMO GHG Study (million tonnes)						ICCT (million tonnes)		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Global CO2 Emissions	3195	3213	3182	3366	3472	3496	3567	3608	3606
	9	3	2	1	6	8	2	4	2
International Shipping	881	916	858	773	853	805	801	813	812
Domestic Shipping	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Fishing	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Total Shipping	1100	1135	977	914	1021	942	910	930	932
% of global	3.5	3.5	3.1	2.7	2.9	2.6	2.5	2.6	2.6

(Sumber: ICCT Report - Melrose PLC, 2017)

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menindak lanjuti permasalahan lingkungan terutama polusi udara. Salah satu turunan dari riset operasi adalah metode optimasi *Green-Ship Routing Problem (G-SRP)*. *G-SRP* dapat diterapkan dalam penentuan rute distribusi menggunakan *mini carrier* di Indonesia. Cara lain untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang sudah diterapkan dalam dunia maritim adalah penggunaan *dual fuel diesel engine*. Pada penelitian ini, akan dilakukan optimasi dengan mempertimbangkan penggunaan *dual-fuel diesel engine* sebagai bagian dari tahap *feasible routes generation*.

Penelitian semacam ini diperlukan karena distribusi LNG akan menjadi salah satu hal yang vital dalam dunia energi di Indonesia yang melibatkan banyak sekali pihak terkait dan investasi. Optimasi diperlukan untuk mendapatkan skenario terbaik untuk memberikan kelayakan yang maksimal baik secara teknis maupun ekonomis. Selain itu, kesadaran terhadap faktor lingkungan sebagai dampak dari industri sudah harus ditingkatkan. Yang menjadi obyek dari tugas akhir ini adalah pembangkit-pembangkit tenaga mesin gas skala kecil yang tersebar di wilayah Sulawesi Tenggara, Maluku, dan Nusa Tenggara.

1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana menentukan rute kapal LNG yang optimal dari segi biaya dan emisi dan mampu memenuhi kebutuhan pasokan gas alam untuk bahan bakar PLTMG dengan menggunakan Bin Packing Problem sebagai bagian dari Green-Ship Routing Problem?
2. Bagaimana menentukan kombinasi kapal dalam rute dan armada dengan variasi ukuran dan tipe diesel penggerak utama: dua-fuel diesel atau conventional diesel dan seperti apa potensi pengurangan biaya operasional dan emisi dalam jaringan pelayaran jika menggunakan bahan bakar LNG?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat agar lingkup penelitian ini lebih fokus, yaitu :

1. Menggunakan satu buah fasilitas likuifaksi/refinery sebagai hub sehingga tipe distribusi dapat diasumsikan sebagai hub-and-spokes network. Hub yang akan digunakan adalah on-shore storage blok Masela di Ambon.
2. Lingkup wilayah yang akan dilayani oleh distribusi hub-and-spokes meliputi daerah Sulawesi Tenggara, Nusa Tenggara, dan Kepulauan Maluku bagian selatan.
3. Pasokan (supply) LNG dari fasilitas likuifaksi diasumsikan selalu cukup untuk memenuhi kebutuhan seluruh PLTMG yang akan dipasok.
4. Satu pembangkit dilayani oleh satu terminal penerima. Jika dua pembangkit terletak pada satu lokasi yang sama atau berdekatan, maka keduanya dapat dilayani oleh satu terminal saja. Setiap kapal hanya melayani satu buah rute.
5. Fungsi obyektif dari proses optimasi adalah biaya dan tidak mempertimbangkan faktor lain seperti *load factor*.
6. Studi ini dilakukan pada lingkup perencanaan strategis dan belum mencapai tahap perencanaan operasional.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan rute kapal LNG yang optimal dari segi biaya dan emisi dan mampu memenuhi kebutuhan pasokan gas alam untuk bahan bakar PLTMG dengan menggunakan *Bin Packing Problem* sebagai bagian dari *Vehicle Routing Problem* dalam konteks pendekatan *Green-Ship Routing Problem*.

2. Menentukan kombinasi kapal dalam rute dan armada yang optimal dengan variasi ukuran dan tipe diesel penggerak utama dua-fuel atau konvensional dengan mempertimbangkan perbandingan biaya operasional dan emisi.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Dapat Mengetahui rancangan distribusi LNG yang optimal dari segi rute, armada, dan kecepatan dalam lingkup transportasi hub and spoke.
2. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian kedepannya yang berkaitan dengan optimasi rute dan armada dengan parameter lingkungan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Liquified Natural Gas (LNG)*

LNG adalah gas alam yang dominan mengandung metana, CH_4 , dengan sedikit campuran gas etana C_2H_6 yang sudah diubah fasenya menjadi fase *liquid*. Pengondisian dalam fase cair ini bertujuan untuk mendapatkan kemudahan dalam penyimpanan maupun transportasi gas alam (Artana dan Soegiono, 2006). Gas alam dalam fase cair mengalami penurunan volume sebesar 1/600 dari volumenya dalam fase gas. Volume gas sebesar 600 m^3 akan turun menjadi hanya 1 m^3 dalam fase cair. Hal ini disebut juga *volumetric efficiency* dari gas alam.

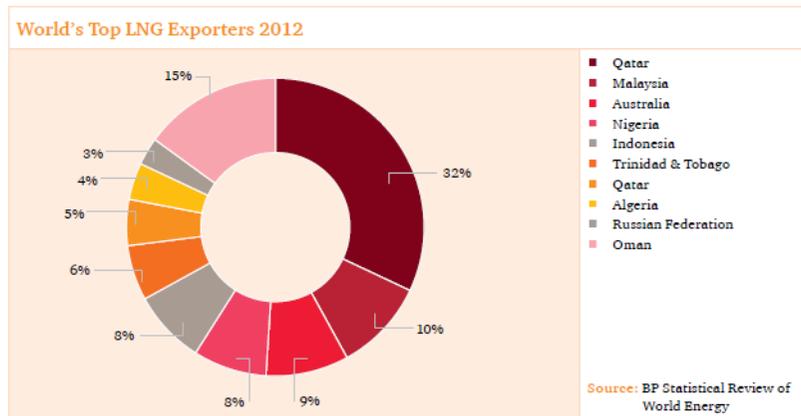


Gambar 2.1 Kapal pengangkut LNG
(Sumber: Safety4Sea, 2020)

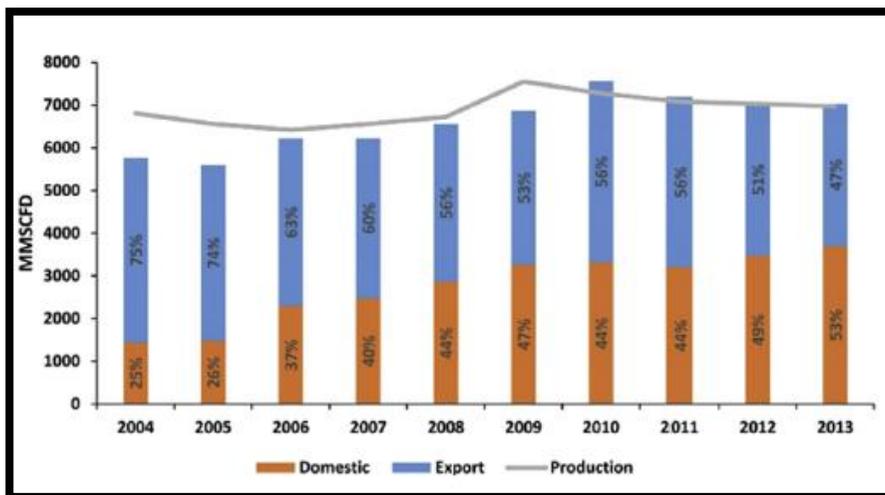
Gas alam menjadi pilihan karena beberapa keunggulan yang dimilikinya sebagai bahan bakar dibandingkan bahan bakar *petroleum* lainnya. Gas alam dalam fase gas tidak berbau, tidak berwarna, tidak beracun, dan tidak bersifat korosif. Meski begitu, gas alam juga memiliki bahaya-bahayanya sendiri. Gas alam dalam fase gas bersifat mudah terbakar. Dalam bentuk LNG, gas alam yang menguap memiliki suhu yang sangat rendah yang dapat berbahaya jika berkontak fisik dengan manusia. Selain itu karena sifatnya yang sulit dideteksi, kebocoran gas alam dapat mengakibatkan manusia mengalami kekurangan oksigen di wilayah sekitarnya tanpa disadari.

2.2. Gas Alam di Indonesia

Indonesia adalah salah satu Negara penghasil gas alam terbesar di dunia. Indonesia masuk kedalam 10 besar Negara pengeksport LNG di dunia. Meski begitu, Indonesia bukanlah 10 besar Negara dengan cadangan gas terbanyak di dunia. Artinya, masih sebagian besar dari gas alam yang diproduksi oleh Indonesia dieksport ke luar negeri, bukan digunakan untuk pemakaian domestik.



Gambar 2.2 Pengeksport LNG terbesar dunia tahun 2012
(Sumber: British Petroleum, 2019)



Gambar 2.3 Produksi dan Kebutuhan gas Domestik Indonesia
(Sumber: Purwanto, *et al*, 2016)

Pada tahun 2014, pemerintah mengeluarkan kebijakan melalui Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Pada kebijakan tersebut pemerintah menetapkan sasaran pembauran sumber energi dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 2.1 Rencana pembagian sumber energi listrik PLN

Jenis Energi	Peran di Tahun 2025	Peran di Tahun 2050
Energi Terbarukan	>23%	>31%
Minyak Bumi	<25%	<20%
Batu Bara	>30%	>25%
Gas Bumi	>22%	>24%

(Sumber: PLN, 2018)

Pada tahun 2025 pemerintah Indonesia menargetkan besar produksi energi listrik berasal dari gas bumi. Jumlah tersebut ekuivalen dengan 8300 MMSCFD yang mana adalah sekitar 3000 MMSCFD lebih banyak dari suplai untuk keperluan domestik saat ini. Akibat dari sasaran tersebut, pemerintah tentu saja harus mendukung dengan menyediakan infrastruktur yang mampu mendorong konsumsi gas alam domestik. Pemerintah Indonesia telah melakukan beberapa upaya untuk meningkatkan konsumsi gas alam domestik. Salah satu upaya yang dilakukan adalah menggunakan gas alam sebagai bahan bakar pembangkitan tenaga listrik. Dengan demikian, diharapkan juga dapat menjawab masalah peningkatan konsumsi listrik dan elektrifikasi.

Tabel 2.2 Kilang produksi LNG di Indonesia dan Statusnya

Field	Reserve (TCF)	LNG Plant	Capacity (MTPA)	Start-up Year	Status
Arun	19.7	Train 1,2,3	5.1	1978	Stopped
		Train 4,5	4.4	1983	Stopped
		Train 6	2.5	1986	Stopped
Badak	14 & 26	Train A,B	6.4	1977	4/8 Stopped
		Train C,D	4.6	1983	
		Train E,F	2.5	1989, 1994	
		Train G,H	2.9, 3.3	1998, 1999	
Tangguh	17	Train 1	3.8	2009	Operation
		Train 2	3.8	2009	Operation
		Train 3	3.8	2019	FEED
Donggi-Senoro	3	Train 1	2	2015	Operation
Abadi, Masela	18	Train 1	2.5	2020	FEED

(Sumber: Purwanto *et al*, 2016)

Tabel diatas adalah kondisi *existing* pada tahun 2016 silam. Dapat dilihat bahwa ada dua kilang LNG yang baru dan baru akan beroperasi yaitu Donggi-Senoro dan

Maka dapat dihitung, rasio konversi r untuk menghitung kebutuhan LNG per hari dari sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas adalah:

$$r = \frac{MMSCFD}{MW} \times \frac{TPD}{MMSCFD} \times \frac{m^3}{Ton} = 7.2 \quad (2.1)$$

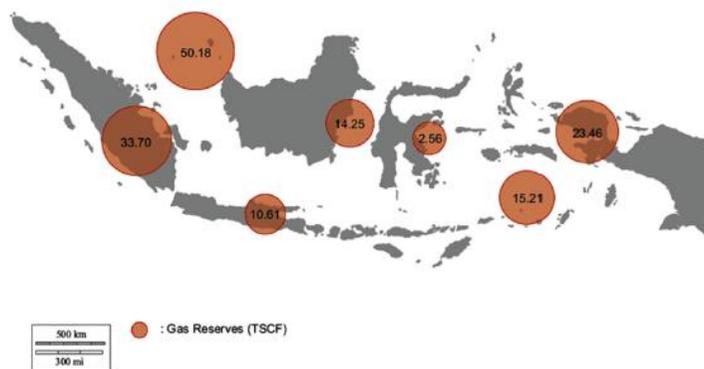
2.3. Rantai Pasok LNG

LNG adalah solusi terhadap sulitnya transportasi gas alam dalam volume besar di daerah-daerah yang tidak terlayani oleh pipa gas. Jarak jauh yang harus dilalui juga membuat instalasi *pipeline* menjadi tidak efisien secara ekonomis karena melibatkan biaya investasi yang sangat besar. Selain itu, monitoring juga akan menjadi sulit. Faktor geografis juga menjadi pertimbangan penting. Daerah Indonesia Timur yang mayoritas berupa lautan dengan kedalaman yang sangat dalam menyebabkan transportasi gas alam dalam bentuk LNG menggunakan kapal menjadi alternatif terbaik.

Oleh karena propertinya yang memiliki titik cair sangat rendah, LNG memiliki rantai pasok yang unik dan berbeda dengan produk bahan bakar fosil lainnya. LNG dikonsumsi sebagai gas alam, namun ditransportasikan sebagai LNG untuk memanfaatkan efisiensi volumetrik akibat perubahan fasenya menjadi cair. LNG didapatkan melalui beberapa tahap sebelum dapat dikonsumsi. Tahap yang pertama adalah eksplorasi dan produksi, likuifaksi, transportasi, dan penyimpanan, serta regasifikasi.

2.3.1. Eksplorasi dan Produksi

Pada tahap ini, ahli di bidang geologi akan melakukan analisa terhadap area-area yang berpotensi memiliki cadangan hidrokarbon. Para ahli akan melakukan pengujian-pengujian untuk membuktikan bahwa area tersebut benar menyimpan hidrokarbon. Kemudian, perusahaan migas akan melakukan *drilling*.



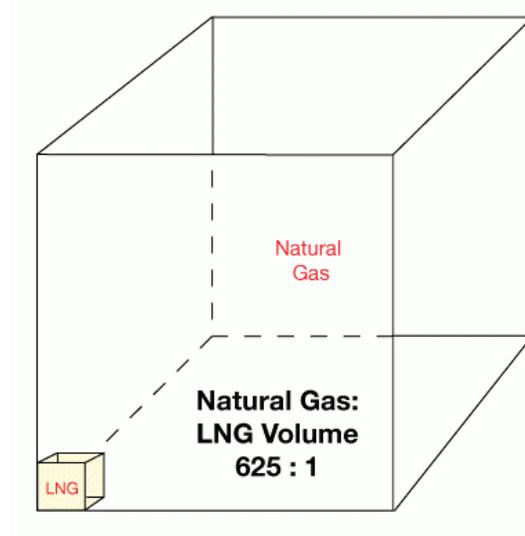
Gambar 2.5 Cadangan Gas Alam Indonesia
(Sumber: Purwanto *et al*, 2016)

Mayoritas cadangan gas alam Indonesia berada di area lepas pantai Natuna, Sumatera Selatan, Kalimantan Timur, Masela, dan Papua Barat. Daerah di perairan lepas pantai Laut Natuna sendiri memiliki potensi yang sangat besar yang diprediksi mencapai paling tidak 46 TCF dengan kandungan karbondioksida 71% (Purwanto *et al.*, 2016).

2.3.2. Likuifaksi

Gas alam yang sudah diekstrak dari cadangan didalam bumi kemudian akan dimurnikan dengan tujuan memisahkan kandungan metana dan etana dengan kandungan propana, butana dan hidrokarbon lainnya. Biasanya, gas alam yang sudah disaring akan memiliki kandungan metana mendekati 100%.

Fasilitas likuifaksi atau kilang LNG biasanya memiliki beberapa sub-unit yang disebut *train*. *Train* yang ada di sebuah fasilitas likuifaksi bekerja sendiri-sendiri secara paralel. Proses likuifaksi menurunkan volume gas hingga 600 kali dari volume awalnya di fase gas. Temperatur likuifaksi gas alam kurang lebih adalah -162°C .



Gambar 2.6 LNG Volumetric Efficiency
(Sumber: IHRDC, 2019)

2.3.3. Transportasi LNG

LNG ditransportasikan dalam bentuk cair menggunakan moda transportasi kapal jika melalui laut, dan truk jika melalui darat. Kapal LNG tergolong sebagai kapal tanker dengan fitur lambung ganda (*double hull*). LNG diangkut didalam tangki-tangki dan dijaga temperaturnya dibawah titik uapnya. Berdasarkan tipe tangkinya, tanker LNG dibedakan menjadi 3:

- A. *Membrane Tanks,*
- B. *Spherical Tanks, and*

C. IHI Prismatic Tanks.

2.3.4. Penyimpanan LNG

Setelah diterima, LNG disimpan didalam tangki-tangki *cryogenic* yang mampu menjaga temperaturnya dibawah -163°C dan dalam tekanan atmosfer. Tangki penyimpanan LNG memiliki ukuran yang bervariasi yang biasanya berada di antara 100,000 sampai 160,000 meter kubik.

2.3.5. Regasifikasi LNG

Regasifikasi LNG dilakukan secara perlahan-lahan menaikkan temperatur LNG dari -163°C sampai 0°C untuk mengubah fasenya dari cair menjadi gas. Kemudian, gas tersebut dapat langsung dikonsumsi atau didistribusikan melalui *pipeline*.



Gambar 2.7 LNG Supply Chain
(Sumber: Artana, 2010)

Rantai pasok LNG melibatkan banyak energi dan fasilitas yang harus dikerahkan. Oleh karena itu, akan lebih efisien apabila LNG didistribusikan langsung dari fasilitas likuifaksi tempat gas alam tersebut diambil dari dalam bumi ke masing-masing pembangkit tanpa harus melalui depo seperti halnya kontainer. Pada penelitian ini, LNG akan didistribusikan dari fasilitas likuifaksi di Saumlaki, Masela, ke setiap pembangkit yang menjadi obyek.

2.4. Komponen LNG Supply Chain

A. LNG Plant

Fasilitas LNG yang dimaksud adalah fasilitas purifikasi dan likuifaksi. LNG *plant* atau biasa juga disebut LNG *Refinery* menerima gas alam dari fasilitas pengeboran. Gas alam tersebut kemudian dimurnikan dari komponen-komponen seperti uap air, karbondioksida, propana, butana, dan lain-lain. Kemudian gas alam tersebut dikondisikan temperaturnya hingga titik uapnya yaitu -162°C supaya menjadi LNG. Dari fasilitas tersebut LNG didistribusikan menggunakan kapal.



Gambar 2.8 LNG Plant Tangguh
(Sumber: BP)

B. LNG Vessel

Kapal LNG adalah media transportasi untuk mengangkut LNG dari fasilitas likuifaksi ke *receiving terminal*. Kapal LNG umumnya digunakan untuk mendistribusikan LNG pada jarak menengah hingga jarak yang sangat jauh. Kapasitas dari kapal LNG bervariasi. Variasi tersebut dikelompokkan didalam kelas-kelas ukuran sebanyak 4 kelompok yang dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 2.3 Klasifikasi ukuran kapal LNG

Kelas Ukuran	Range ukuran
Sangat Besar	>200.000 m ³
Besar	120.000 m ³ ; 138.000 m ³ ; 145.000 m ³
Standard	75.000 m ³
Kecil	< 40.000 m ³

Distribusi LNG di Indonesia lebih cocok menggunakan *small-scale LNG carrier*. Ukuran kapal-kapal *Mini-LNG carrier* yang digunakan antara lain kapal dengan kapasitas 1100 m³, 2500 m³, 7500 m³, 7500 m³, dan 15600 m³.

C. LNG Receiving Terminal

LNG Receiving Terminal menerima LNG dari kapal pengangkut LNG yang kemudian disimpan didalam tangki-tangki LNG. Terminal penerima juga biasanya memiliki fasilitas regasifikasi. FSRU (*Floating Storage and Regasification Unit*) adalah sebuah kapal khusus yang dimanfaatkan sebagai terminal penerima LNG.

Terminal penerima LNG sendiri terdiri dari beberapa fasilitas yang menunjang fungsinya. Sebagai bagian dari rantai pasok gas alam, sebuah terminal penerima harus paling tidak memiliki fasilitas seperti yang disebutkan dibawah.

2.5. Data PLTMG di *Cluster Nusa Tenggara*

Kepulauan Nusa Tenggara atau Kepulauan Sunda Kecil adalah kepulauan yang terletak di sebelah timur Pulau Bali. Kepulauan Barat Daya dan Kepulauan Tanimbar yang secara administratif merupakan wilayah provinsi Maluku Selatan secara geologis juga termasuk wilayah gugus pulau Nusa Tenggara.

RUPTL PLN menyebutkan rencana penyediaan listrik di Indonesia di Kepulauan Nusa Tenggara sebagai bagian dari *Cluster LNG* Nusa Tenggara yang memiliki sekurangnya 7 PLTMG yang tersebar di wilayah Nusa Tenggara Timur dan Nusa Tenggara Barat.

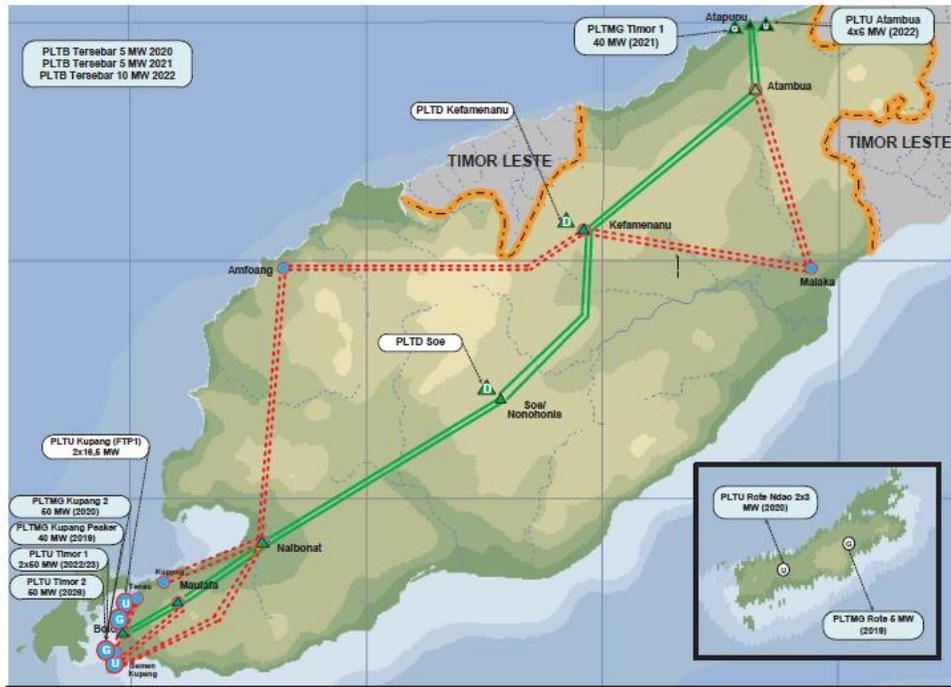


Gambar 2.9 Peta Wilayah Nusa Tenggara

Adapun kapasitas dari tiap pembangkit di *cluster* Nusa Tenggara dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 2.4 Rincian Kapasitas Pembangkit di *Cluster Nusa Tenggara*

Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)
1	PLTMG Rote	6
2	PLTMG Waingapu	10
3	PLTMG Waitabula	10
4	MPP Flores	20
5	PLTMG Maumere	40
6	PLTMG Kupang 2	50
	PLTMG Kupang Peaker	40
7	PLTMG Timor 1	40



Gambar 2.10 Pembangkit di Pulau Timor
(Sumber: RUPTL PLN 2018-2027)

2.6. Data PLTMG Cluster Sulbagtra

Berdasarkan RUPTL PLN 2018-2027, saat ini PLN sedang mengembangkan *cluster LNG* di daerah Sulawesi Bagian Tenggara. PLN sedang melakukan studi optimasi logistic LNG untuk memenuhi kebutuhan gas di PLTMG yang ada di Kendari, Bombana, Kolaka Utara, Baubau, Wangiwangi, dan Selayar. Zona tersebut disebut oleh PLN sebagai *cluster LNG Sulbagtra* (Perusahaan Listrik Negara, 2018).



Gambar 2.11 PLTMG Kendari dan Bau-Bau



Gambar 2.12 Lokasi PLTMG Selayar dan Selayar 2

Adapun berdasarkan RUPTL PLN, rincian pembangkit yang harus disuplai dengan gas alam adalah sebagai berikut:

Tabel 2.5 Rincian Kapasitas Pembangkit di *Cluster Sulbagtra*

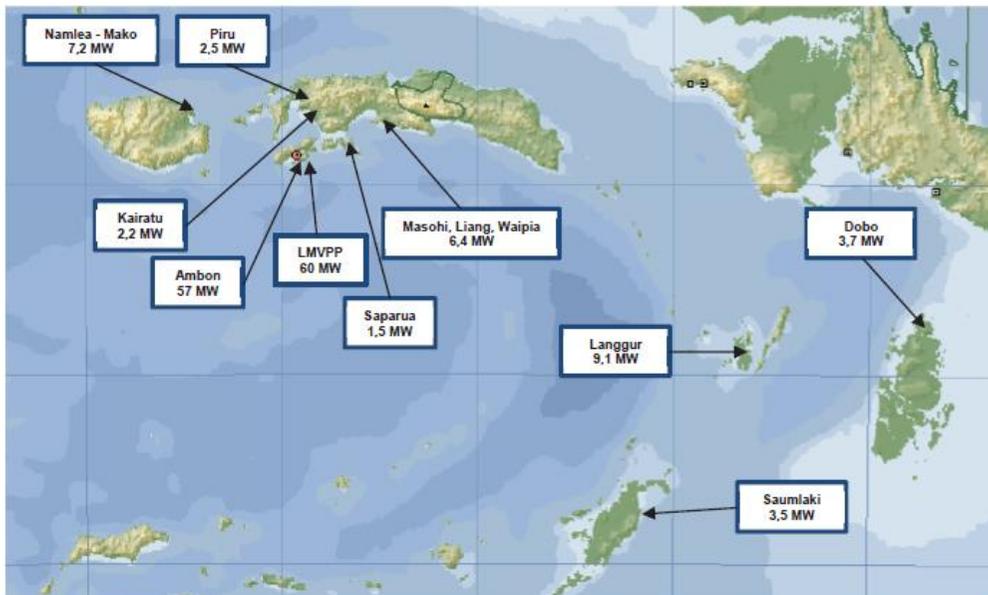
Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)
1	PLTMG Kendari	50
2	MPP Bombana	10
3	MPP Bau-bau	30
4	MPP Kolaka Utara	5
5	PLTMG Selayar 1&2	20

2.7. Data PLTMG Cluster Maluku Selatan

Berdasarkan RUPTL PLN 2018-2027, kawasan Indonesia Timur akan dibagi menjadi 3 *cluster* yaitu Maluku Utara, Papua Utara, dan Maluku-Papua Bagian Selatan. RPTUL menyebutkan bahwa pasokan gas alam akan disuplai oleh *LNG Plant* Tangguh. Untuk area Ambon, Maluku Tersebar, dan Halmahera merupakan bagian dari *cluster LNG* Maluku Utara.



Gambar 2.13 Peta Sebagian Wilayah Maluku



Gambar 2.14 Pembangkit di Kepulauan Maluku (RPTUL PLN)

Kemudian, tabel dibawah ini menunjukkan daftar pembangkit listrik tenaga minyak dan gas yang ada di *cluster* Maluku. Daftar tersebut juga menunjukkan kapasitas dari setiap pembangkit. Untuk pembangkit Ambon pada tugas akhir ini tidak dimasukkan sebagai *demand point* dikarenakan letak *hub* yang ada di lokasi dekat

dengan PLTMG Ambon. Oleh karena itu, untuk PLTMG Ambon diasumsikan tidak butuh kapal untuk mentransportasikan gas alam dari *hub* ke PLTMG.

Tabel 2.6 Rincian Kapasitas Pembangkit di *Cluster Maluku*

Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)
1	PLTMG Ambon Peaker	120
	PLTMG Ambon 2	
	PLTMG Ambon	
2	PLTMG Langgur	40
	PLTMG Langgur 2	
	PLTMG Langgur 3	
3	PLTMG Bula	10
4	PLTMG Namlea	20
	PLTMG Namlea 2	
5	PLTMG Saumlaki	20
	PLTMG Saumlaki 2	
6	PLTMG Dobo	20
	PLTMG Dobo 2	
7	PLTMG Seram	40
	PLTMG Seram 2	
8	PLTMG Seram Utara	20
9	PLTMG Saparua	5
10	PLTMG Namrole	10
11	PLTMG Masela	20
TOTAL		325

(Sumber: RUPTL PLN 2018-2027)

2.8. Pola Operasi Pelayaran

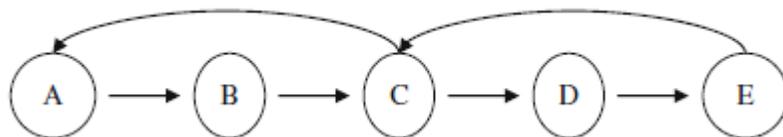
Menurut Ma Shuo, terdapat tiga jenis pola operasi pelayaran (Shuo, 1999). Jenis pelayaran tersebut antara lain: *Industrial*, *Liner*, dan *Tramp*. Ketiga jenis pelayaran tersebut memiliki ciri khas masing-masing.

Pada pola pelayaran *tramp*, kapal kargo tidak memiliki rute yang spesifik dan tetap. Kebanyakan *tramper* adalah kapal yang mengangkut muatan yang Homogen dalam jumlah yang banyak. *Tramper* biasanya adalah kapal-kapal bermuatan curah (*bulk carrier*). *Tramper* umumnya adalah kapal *charter* yang berlayar mengikuti permintaan dari *charterer* pada suatu jangka waktu sewa tertentu atau jumlah *trip* tertentu.

Pada pola pelayaran *Industrial*, kapal yang dimiliki suatu perusahaan memiliki rute, muatan, dan kapasitas yang tetap pada setiap pelayaran. Pelayaran *Industrial* bertujuan untuk menunjang produksi atau operasi dari perusahaan tersebut.

Pada pola pelayaran *Liner*, kapal memiliki rute dan jadwal yang spesifik dan tetap. Biasanya, layanan pelayaran *liner* memiliki kapasitas yang besar dengan kemampuan lintas samudera. Tipe kapal yang paling banyak pada tipe pelayaran *liner* antara lain *container*, kapal penumpang, dan RoRo. Lebih dari 60% transportasi barang melalui laut hari ini menggunakan layanan pelayaran jenis *liner* yang mana kebanyakan menggunakan media kapal kontainer.

Dalam pelayaran *liner*, rute yang dilalui oleh suatu kapal tetap dalam jadwal yang tetap pula. Konsep tersebut mirip dengan konsep bus, angkutan kota, maupun kereta dalam kota. Sebuah rute diawali dari satu titik pelabuhan kemudian ke pelabuhan-pelabuhan lainnya dan berakhir di titik pelabuhan mula-mula. Satu putaran tersebut biasa disebut dengan istilah round trip. Dibawah ini adalah salah satu contoh skema pelayaran *liner* yang melalui titik: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow A$.



Gambar 2.15 Pola Pelayaran *Liner*
(Sumber: Tzung-Nan Chuang, 2010)

Transportasi LNG dapat dianggap sebagai pelayaran *liner non-pick-and-delivery* yang tidak mungkin menambahkan muatan di *feeder port*.

2.9. Definisi dan Jenis Biaya

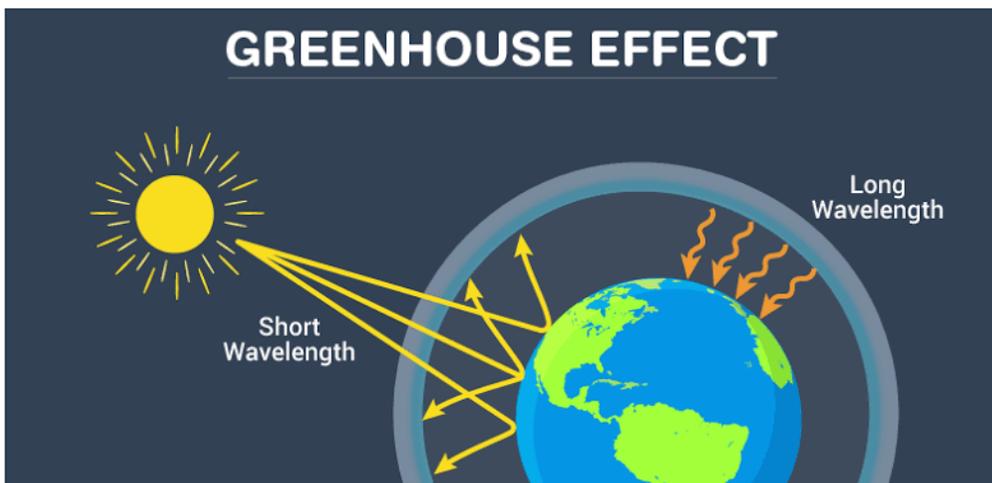
Tujuan dari sebuah bisnis adalah untuk menghasilkan keuntungan (*profit*). Profit adalah selisih antara pemasukan (*revenue*) dan pengeluaran atau biaya (*cost*). Sebuah perusahaan yang menjalankan bisnis tentunya mengharapkan *profit* yang bernilai positif. Memaksimalkan *profit* dapat dilakukan dengan menaikkan pemasukan atau menurunkan biaya. Oleh karena itu, biaya adalah komponen yang sangat penting bagi perusahaan dalam hal ini perusahaan pelayaran.

Pada tugas akhir ini, biaya yang akan digunakan adalah biaya sewa kapal, biaya rugi emisi, biaya bahan bakar, biaya operasional pelabuhan, dan biaya perawatan dan pemeliharaan. Biaya emisi adalah konversi jumlah CO₂ akibat pembakaran kedalam bentuk mata uang (*monetizing*). Seluruh komponen biaya tersebut merupakan biaya total yang dikeluarkan oleh satu buah *subset*. Biaya tersebut kemudian dijumlahkan secara total sebagai total biaya annual.

2.10. *Green House Effect* dan CO₂

Emisi menurut KBBI adalah kandungan gas mesin yang dibuang ke udara. Emisi memiliki kandungan yang beragam diantaranya CO_x, NO_x, SO_x, dan gas-gas hasil pembakaran lainnya. Emisi memiliki dampak terhadap sekitarnya baik itu lingkungan maupun makhluk hidup. Salah satu emisi yang paling meresahkan adalah CO₂.

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas yang menyebabkan efek rumah kaca. Efek rumah kaca adalah sebuah fenomena alam yang terjadi saat ini. Burnie (2005) menyatakan bahwa efek rumah kaca merupakan hal yang sangat penting bagi semua kehidupan di bumi. Efek tersebut mengubah atmosfer menjadi isolator searah, energi sinar matahari yang akan mencapai tanah terhalangi oleh aliran kembali energi tersebut keluar dari bumi menuju ke luar angkasa sehingga jika tidak ada efek rumah kaca suhu di bumi pada malam hari akan sangat dingin.



Gambar 2.16 Visualisasi Efek Rumah Kaca
(climatecentra.org, 2019))

Kekuatan efek rumah kaca tergantung pada jumlah karbon yang ada di atmosfer, semakin banyak terdapat gas tersebut maka semakin sulit panas keluar dari bumi. Pendapat ini ditambahkan oleh Fardiaz (1992) efek rumah kaca merupakan meningkatnya suhu rumah kaca karena adanya atap dan dinding kaca yang terbentuk oleh konsentrasi gas CO₂ yang tinggi di atmosfer, menjadi seperti filter satu arah sehingga CO₂ mengabsorpsi radiasi gelombang panjang dan menyebabkan suhu bumi meningkat.

Ada 6 jenis gas emisi yang menyebabkan efek rumah kaca yang telah disepakati dalam Protokol Kyoto, yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), nitrooksida (N₂O), *chloro-fluoro-carbon* (CFC), *hydro-fluoro-carbon* (HFC), dan sulfur heksafluorida (SF₆) (Susanta dan Sutjahjo 2007).

Emisi Karbondioksida pada kapal dapat dihitung secara sederhana dengan mengalikan total konsumsi bahan bakar dengan faktor karbon. Secara sederhana, emisi CO₂ adalah:

$$CO_2 \text{ emissions [tonnes } CO_2] = F_{CO_2} \times \frac{\text{tonnes } CO_2}{\text{tonnes fuel}} \times F \text{ [tonnes fuel]} \quad (2.2)$$

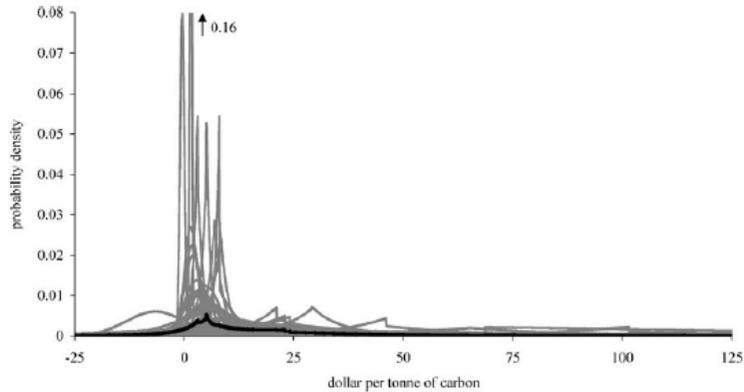
Sebelum tahun 2009, faktor emisi yang biasa digunakan sebagai nilai empiris perhitungan emisi CO₂ adalah 3.17 kg CO₂/kg bahan bakar. Pada pengembangannya, ada variasi terhadap faktor konversi tersebut yang melibatkan banyak pihak dan konvensi Internasional seperti *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, *Kyoto Protocol*, dan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Namun, studi IMO terbaru menyebutkan angka 3.1144 kgCO₂ per ton untuk *heavy fuel oil* dan 3.206 kgCO₂ per ton untuk *gas oil* (IMO, 2008).

2.11. Marginal Damage Cost (MDC)

Menurut Richard S.J. Tol, tantangan yang menjadi kunci dari perubahan iklim adalah bagaimana mendefinisikan dampak perubahan iklim dan pemanasan global dengan indikator-indikator yang mampu mewakili (Tol, 2005). Ada beberapa penelitian yang sudah mencoba memberikan indikator seperti jumlah orang terdampak, perubahan laju pertumbuhan tumbuhan (White *et al.*, 1998), dan jumlah sistem terdampak (Alcamo, Krol dan Leemans, 1995). Indikator fisik seperti yang disebutkan sebelumnya mungkin tepat dalam untuk menganalisa dampak emisi pada sektor alam, namun masih kurang mewakili kesejahteraan manusia yang merupakan parameter pertimbangan yang paling ideal.

Salah satu cara untuk menghubungkan emisi dengan kesejahteraan manusia adalah dengan menggunakan indikator biaya atau dalam bahasa lain moneter. Dalam satuan uang atau biaya, emisi dapat lebih mudah dianalisa dampaknya terhadap sistem-sistem milik manusia yang didasari oleh biaya. Meski begitu, sangat tidak mudah dalam menetapkan nilai yang tetap dan dapat di percaya.

Oleh karena itu, Tol (2005) melakukan penelitian yang menganalisa secara statistic berbasis ketidak tentuan terhadap 103 estimasi biaya kerusakan marjinal (MDC). 28 diantaranya adalah penelitian terpublikasi yang kemudian dikombinasikan secara statistic menghasilkan sebuah *probability density function*.



Gambar 2.17 Estimasi *Marginal Damage Cost* USD per Ton Karbon
(Sumber: Tol, 2005)

Grafik diatas adalah *probability density function* hasil dari penelitian yang dilakukan Richard S. J. Tol. Dengan kombinasi dari seluruh studi yang ada, modus dari MDC adalah \$2/tC, median adalah \$14/tC, dengan rata-rata \$16/tC.

Untuk semua aplikasi praktis di seluruh dunia, ketidaktentuan dampak dari perubahan iklim cukup besar, namun dapat dipastikan bahwa biaya kerusakan marjinal emisi karbondioksida adalah 50\$/tC dan sangat mungkin lebih kecil dari itu. Pada tugas akhir ini, nilai yang diambil dipilih secara kualitatif yaitu nilai tengah antara rata-rata dan nilai maksimal yaitu 35\$/tC.

Konsumsi bahan bakar yang kapal di sebuah rute tertentu dapat dihitung dengan menghitung besar konsumsi bahan bakar di tiga kondisi yaitu kondisi berlayar dalam area pelabuhan satu, antar pelabuhan, dan dalam area pelabuhan dua. FC dapat dihitung menggunakan formula berikut:

$$FC = P \times SFOC \times t \text{ [ton/jam]} \quad (2.3)$$

Dimana P adalah daya mesin pada kondisi *service* yang diasumsikan sebesar 85% daya mesin pada kondisi maksimal (MCR) untuk pelayaran antar pelabuhan dan 30% untuk pelayaran didalam pelabuhan. Dimana nilai *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) diambil dari spesifikasi mesin utama kapal. Nilai SFOC berbeda pada tiap variasi kecepatan namun pada penelitian ini dianggap tetap untuk menghindari kompleksitas yang terlalu tinggi. Variabel terakhir adalah *t* yang merupakan waktu pelayaran dalam satuan jam.

2.12. Optimasi

Menurut Jorge dan Stephen (1999), optimasi adalah alat penting dalam ilmu pengambilan keputusan dan analisa sistem fisik (Nocedal dan Wright, 1999). Untuk melakukannya, kita harus mengidentifikasi obyektif. Obyektif adalah ukuran kuantitatif dari performa sistem yang dipelajari. Obyektif tersebut dapat berupa waktu, keuntungan, energi, dan lain-lain. Kondisi yang optimal adalah ketika obyektif tersebut diperoleh seminimal atau semaksimal mungkin.

Nilai dari obyektif tersebut dipengaruhi oleh nilai-nilai lain yang merupakan bagian dari sistem tersebut. Nilai-nilai yang mempengaruhi tersebut disebut sebagai Variabel atau Variabel Keputusan. Sebagai contoh dalam sebuah pelayaran, maka variable yang mempengaruhi adalah konsumsi bahan bakar, tarif pengangkutan, jumlah muatan yang diangkut, durasi pelayaran, dan lain-lain. Semua variable tersebut akan memengaruhi *profit* yang diterima oleh perusahaan.

Variabel-variabel tersebut sering kali terbatas oleh suatu nilai tertentu yang biasa disebut *constraints* yang akan menjadi batasan dalam pemilihan. Seluruh *constraints* wajib dipenuhi supaya hasil optimasi tersebut dapat dianggap valid.

Tujuan dari optimasi adalah menemukan kombinasi dari nilai-nilai Variabel Keputusan yang memenuhi semua *constraint* dan dapat memberikan nilai obyektif yang optimal, baik maksimal ataupun minimal.

Menurut Jorge (1999), optimasi dilakukan paling tidak melalui tiga tahap menurut yaitu formulasi, iterasi, dan analisa sensitivitas.

2.12.1. Permodelan/Formulasi

Langkah pertama adalah memodelkan permasalahan yang akan dianalisa dalam bentuk matematis supaya dapat diolah. Permodelan merupakan tahap yang sangat penting namun sulit. Model yang terlalu sederhana tidak akan menghasilkan hasil yang baik, sedangkan model yang terlalu sulit akan menyebabkan kesulitan dalam iterasinya.

2.12.2. Iterasi

Setelah model ditetapkan, sebuah algoritma optimasi dapat digunakan untuk mengolah model tersebut. Tidak ada algoritma yang bersifat universal sehingga dapat digunakan untuk semua masalah optimasi. Oleh karena itu, dibutuhkan pemilihan algoritma yang tepat dan cocok dengan model permasalahan yang akan dianalisa.

2.12.3. Analisa Sensitivitas

Perubahan input dapat memberikan variasi output hasil optimasi. Artinya ada suatu sensitivitas dari model dan iterasi. Langkah ini dapat dilakukan untuk mengevaluasi dan mengembangkan model yang telah disusun.

2.13. *Linear Programming* dan *Integer Linear Programming*

Linear Programming adalah jenis optimasi dimana semua persamaan baik persamaan pada fungsi obyektif maupun *constraint* bersifat linear. *Linear*

Programming banyak diaplikasikan di dunia manajemen dan teknik. Ada banyak sekali aplikasi dari LP contohnya: *travelling salesman problem*, *Vehicle Routing Problem*, dan *Scheduling Problem*.

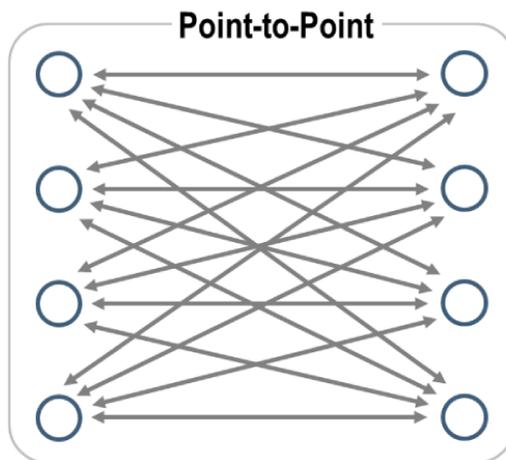
Integer Linear Programming digunakan apabila hasil optmisi hanya akan masuk akal apabila hasilnya adalah bilangan bulat real. Hasil tersebut dapat didapat dengan metode *branch and bound* yang dapat dilakukan dengan bantuan software seperti *Opensolver*, *Excel Solver*, dan *LINGO* (Dasira, 2004).

2.14. Jenis-jenis jaringan transportasi

Secara luas ada dua jenis jaringan transportasi yaitu *Point to Point* dan *Hub and Spokes*.

- Point to Point Network

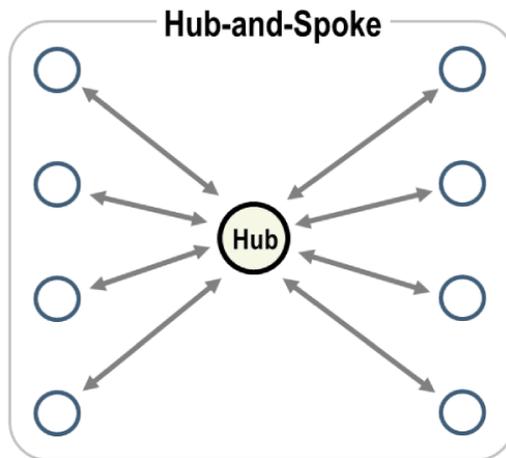
Point to Point Network (Gambar 19) adalah jaringan transportasi yang menghubungkan antara dua titik secara langsung tanpa perantara atau transit apapun. Dengan tipe ini, transportasi menjadi lebih cepat namun akan lebih berbiaya karena banyaknya moda transportasi yang dibutuhkan.



Gambar 2.18 *Point to Point Network*
(Sumber: *GeometryOfTransportation*)

- Hub and Spokes Network

Hub and Spokes Network adalah jaringan transportasi yang menghubungkan titik titik melalui sebuah pusat yang dinamakan *hub*. *Hub* akan terhubung ke setiap titik yang disebut *spokes*. Flexibilitas dan efisiensi dari segi biaya membuat model transportasi *Hub and Spokes* banyak diterapkan di bidang transportasi/logistik.



Gambar 2.19 Jaringan *Hub and Spoke*
(Sumber: *GeometryOfTransportation*)

Pada setiap *subset* akan dilakukan perkiraan waktu pelayaran dengan bantuan *Travelling Salesman Problem*. *TSP* akan menemukan rute terpendek dari kumpulan titik pada *subset* yang kemudian menjadi acuan untuk menghitung durasi pelayaran pada *subset*.

2.15. Abadi Gas Field dan LNG Masela

Beberapa tahun kedepan, sumber pasokan LNG di Indonesia akan bertambah dengan beroperasinya LNG Wasambo, LNG Donggi-Senoro, dan LNG Masela. Saat ini, pembangunan proyek kilang gas alam masala telah mencapai tahap *Front End Engineering Design (FEED)* dan direncanakan akan menghasilkan LNG sebesar 761 MMSCFD pada tahun 2025 (Purwanto *et al.*, 2016).

Proyek LNG Abadi adalah proyek LNG berbasis *on-shore* yang sedang dalam proses persiapan oleh INPEX dan SHELL sebagai pengembangnya. Kapasitas produksi diproyeksikan mencapai 9.5 MTPA dan sekitar 35000 barel kondensat setiap harinya.

Pada Desember tahun 2010, otoritas menyetujui Rencana Pengembangan Awal atau *Plan of Development-1 (POD-1)*. Pada *POD-1*, diajukan pemakaian *Floating Liquefied Natural Gas (FLNG)* dengan kapasitas produksi 2.5 MTPA. Kemudian, pada tahun 2015, akibat survey yang membuktikan bahwa volume cadangan ternyata lebih besar, INPEX mengajukan revisi terhadap *POD-1*. Pada revisi tersebut, diproyeksikan produksi mencapai 7.5 MTPA.

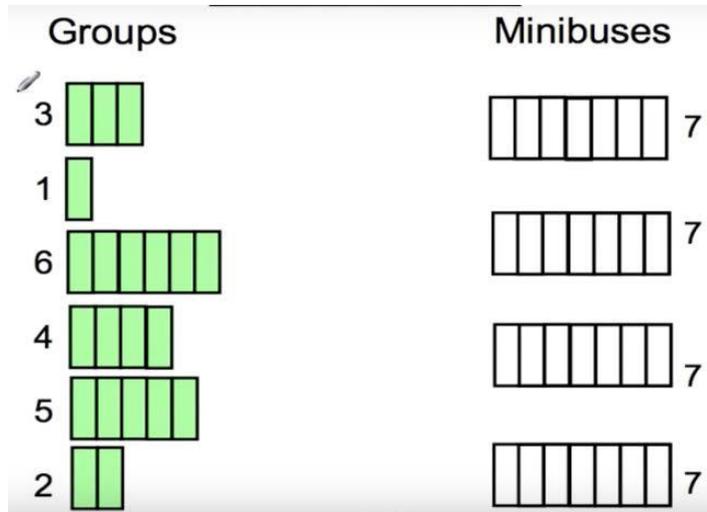
Lokasi *on-shore storage* LNG dari blok Masela ditetapkan berada di Ambon (Putra, Made Arya Satya Dharma Artana dan Handani, 2016). Lokasi tersebut akan digunakan sebagai *hub* pada tugas akhir ini.



Gambar 2.20 Lokasi Cadangan Gas Alam di Masela
(Sumber: Google Map)

2.16. Bin Packing Problem (BPP)

Bin Bin Packing adalah algoritma yang mencoba mencari susunan dari kumpulan obyek tertentu dengan volume atau berat tertentu kedalam sekumpulan wadah atau disebut juga *containers* atau *bins* (Siringoringo, 2014). Setiap obyek memiliki ukuran atau beratnya masing-masing dan setiap *container* memiliki kapasitas maksimumnya masing-masing. BPP akan mencoba menyusun obyek tersebut sehingga semua obyek dapat diangkut dengan jumlah *container* yang minimal. BPP adalah algoritma *NP-hard* (Garey dan Johnson, 1978) artinya ia dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *NP-complete* seperti *Vehicle Routing Problem (VRP)*. (Das, Mathieu dan Mozes, 2011)



Gambar 2.21 Aplikasi *Bin Packing Problem*
(Sumber: swordfish.github.io)

Tugas akhir ini akan mencoba menyelesaikan permasalahan *VRP* klasik yaitu *VRP* dengan batasan kapasitas (Braekers, Ramaekers dan Van Nieuwenhuysse, 2016). Kapasitas yang dimaksud adalah kapasitas kapal maksimal yang mampu dimuati oleh gas alam. Jika w_j adalah berat atau volume dari item j dan c adalah kapasitas setiap wadah (*bin*), tempatkan setiap benda didalam satu wadah sehingga berat di setiap wadah tidak melebihi nilai c dan jumlah wadah adalah minimum. Formulasi matematis yang tepat untuk permasalahan tersebut adalah;

Minimize

$$z = \sum_{i=1}^n y_i \tag{2.4}$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \leq c y_i, \quad i \in N = \{1, \dots, n\}, \tag{2.5}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j \in N, \tag{2.6}$$

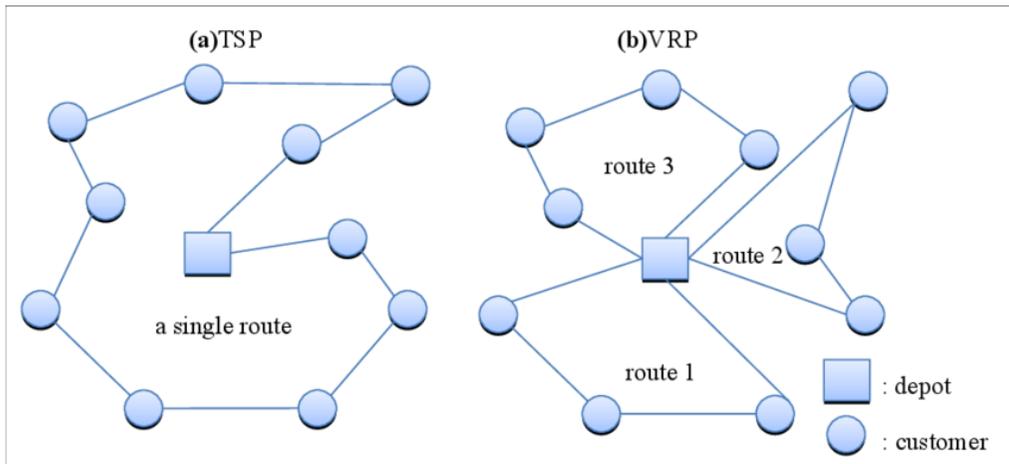
$$y_i = \{0,1\}, \quad i \in N, \tag{2.7}$$

$$x_{ij} = \{0,1\}, \quad i \in N, j \in N. \tag{2.8}$$

Dimana y_i bernilai 1 artinya wadah i digunakan, dan 0 jika tidak. Dimana x_{ij} bernilai 1 apabila benda j ditampung di wadah i , dan 0 jika tidak. Perlu ditetapkan bahwa w_j adalah nilai *integer* positif dan nilai w_j lebih kecil dari c . *Bin Packing Problem* pada tugas akhir ini akan disesuaikan dengan permasalahan *VRP*. *BPP* dengan aplikasi *VRP* menghasilkan sebuah algoritma optimasi yang hampir sama dengan *Set Partitioning Problem* (*SPP*) yang akan memilih kandidat berdasarkan *subset-subset* yang mungkin dengan *constraint* tertentu sehingga biaya pelayaran menjadi minimal. Rincian dari modelnya dapat dilihat di BAB 3 Metodologi Penelitian.

2.17. Vehicle Routing Problem dan Set Partitioning Problem

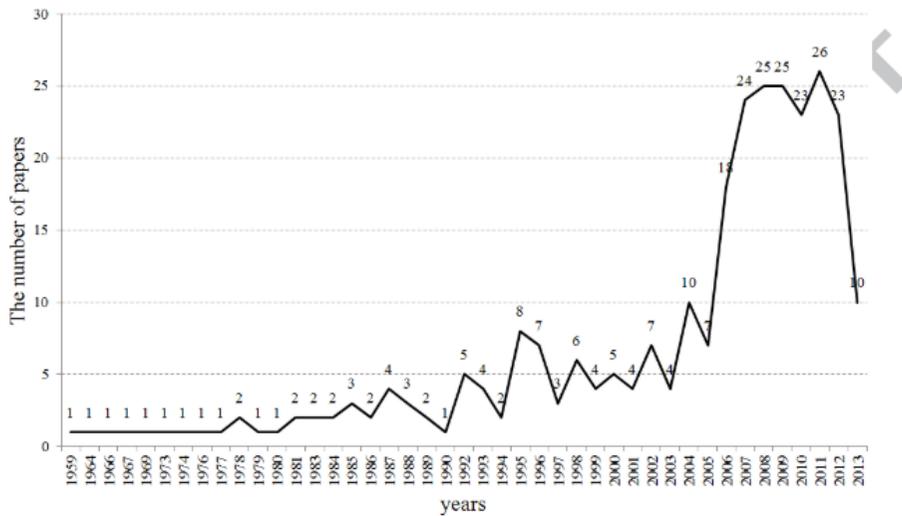
Vehicle Routing Problem (VRP) adalah optimasi kombinatorial berbasis *Integer Linear Programming* yang digunakan untuk mengoptimasi rute dan armada untuk melayani *customers* tertentu yang memiliki volume *demand* tertentu. *VRP* pertama kali dicetuskan oleh Dantzig dan Ramser pada tahun 1959 dengan tema “*Truck Dispatching Problem*”. *VRP* adalah elemen penting dalam bidang transportasi, distribusi, dan logistik.



Gambar 2.22 *VRP vs TSP*
(Sumber: *ResearchGate*)

Ada bermacam-macam varian dari *VRP* yang dikembangkan dalam dunia riset seperti *Pollution Routing Problem* dan *Vehicle Routing Problem with Time Window*. Varian tersebut ada untuk memenuhi kebutuhan industri yang memiliki pertimbangan yang berbeda-beda.

Lin (2014) melakukan kajian *review* terhadap semua model *VRP* yang telah dikembangkan untuk dikerucutkan menjadi sebuah survey mengenai *G-VRP*. (Lin *et al.*, 2014).



Gambar 2.23 Paper per tahun dengan tema VRP
(Lin, 2014)

Model-model VRP yang pernah dikembangkan antara lain:

1. Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP),
2. Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP),
3. Pick-up and Delivery Problem (PDP),
4. Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP),
5. Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP),
6. Location Routing Problem (LRP),
7. Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW),
8. Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP),
9. Green-Vehicle Routing Problem (G-VRP),
10. dan lain-lain.

Set Partitioning, Set Covering, dan Travelling Salesman (Shortest Distance), adalah struktur-struktur integer linear programming yang paling luas diaplikasikan di banyak bidang di dunia. Permasalahan penentuan armada dan rute dapat diformulasikan sebagai *Set Partitioning Problem* (Fagerholt, 1999). Jika R adalah himpunan dari semua rute yang layak (*feasible routes*), dan N adalah himpunan semua pelabuhan yang akan dilayani oleh armada, C sebagai unit biaya transportasi, dan x_r sebagai bilangan biner, maka;

Minimize:

$$\sum_{r \in R} (C_r^{TC} + C_r^{OP}) x_r, \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana,

$$\sum_{r \in R} A_{ir} x_r = 1, \forall i \in N, \dots \dots \dots (2.7)$$

$$x_r \in \{0,1\}, \forall r \in R \dots \dots \dots (2.8)$$

Persamaan (2.6) meminimalkan total biaya transportasi berdasarkan komponen-komponen biaya yang dipertimbangkan. Persamaan (2.7) memastikan bahwa setiap *node* dilayani oleh satu kapal pada armada. Persamaan (2.8) adalah *constraint* yang memastikan nilai biner.

Set Partitioning Problem menentukan bagaimana bagian-bagian dari sebuah himpunan bisa dipecah menjadi subsets. Setiap bagian dari himpunan tersebut harus terkandung dalam satu dan hanya satu subset atau partisi. Metode ini banyak diaplikasikan dalam berbagai macam kasus nyata dan penelitian seperti Optimasi Distribusi LNG di Indonesia Bagian Tengah (Setyorini, 2018).

SPP dimodelkan dengan melakukan enumerasi pada setiap subset yang mungkin (*feasible*) (Balasf, 1976). Keuntungan dari penggunaan SPP adalah optimasi dapat dilakukan dengan linear programming. Kekurangannya adalah kompleksitas akan meningkat drastis semakin banyak item yang dimasukkan kedalam himpunan tersebut jika tidak menggunakan *column generation*.

2.18. Green Ship Routing Problem (G-SRP)

Model-model optimasi rute selama ini atau *vehicle routing problem* (VRP) hanya mempertimbangkan faktor biaya atau keuntungan dan belum mempertimbangkan aspek lingkungan. GVRP adalah pengembangan dari VRP yang baru-baru ini sedang dikembangkan oleh banyak peneliti. GVRP bertujuan untuk memasukkan faktor emisi gas rumah kaca yang diproduksi kedalam model optimasi.

Saat ini, belum banyak penelitian yang membahas hal tersebut di aplikasi maritim. Bektas dan Laporte (2011) mencetuskan sebuah model optimasi yang dinamakan Pollution-Routing Problem. Model tersebut sangat baik dalam menentukan rute transportasi yang optimal dalam hal biaya dan emisi. Bahkan, model tersebut juga mempertimbangkan adanya *time windows*. Namun sayang sekali model tersebut dikhususkan untuk aplikasi di darat. Bahkan, fungsi obyektifnya mengandung variabel-variabel yang tidak *applicable* jika ingin dipakai di kasus maritim.

Menurut Kontovas (2014), ada 3 pendekatan untuk menanamkan pertimbangan emisi kedalam sebuah model optimasi. Pendekatan-pendekatan tersebut yaitu:

1. Konstruksi fungsi obyektif baru yang dapat meminimalkan emisi.

2. Melakukan internalisasi faktor emisi terhadap model yang sudah ada. Salah satu caranya adalah dengan mengonversi nilai emisi menjadi biaya dengan menggunakan tetapan biaya per satuan emisi yang biasanya dalam USD/gram.
3. Menambah *constraint* yang membatasi produksi emisi di setiap *leg, trip*, tahun, atau armada secara keseluruhan.

Pada penelitian ini akan diterapkan pendekatan yang kedua yaitu dengan melakukan internalisasi faktor emisi terhadap model yang sudah ada. Yaitu dengan menambahkan faktor emisi kedalam biaya dengan konversi biaya kerusakan marjinal (*marginal damage cost*) yang didapat dari penelitian yang dilakukan oleh Tol (2005) terhadap 28 studi yang diterbitkan dan 133 estimasi nilai biaya kerusakan marjinal akibat CO₂.

Minimize:

$$\sum_{r \in R} (C_r + C_r \times p) x_r \dots \dots \dots (2.9)$$

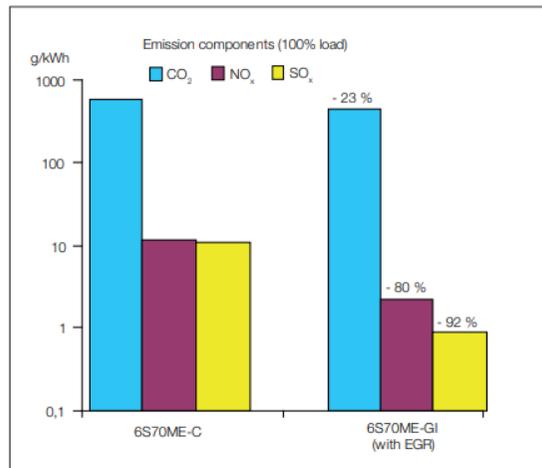
Subject to:

$$\sum_{r \in R} A_{ir} x_r = 1 \quad \forall i \in N \dots \dots \dots (2.10)$$

$$x_r \in \{0,1\}, \quad \forall r \in R \dots \dots \dots (2.11)$$

2.19. LNG Sebagai Bahan Bakar Kapal

Dual Fuel Engine dapat digunakan sebagai alternatif sebagai penggerak utama kapal LNG. Dual Fuel Diesel Engine dapat menggunakan gas alam sebagai bahan bakar. Disebut dual fuel karena DFDE masih menggunakan bahan bakar minyak sebagai *pilot fuel*, namun demikian, sebagian besar bahan bakar yang digunakan adalah gas.



Gambar 2.24 Penurunan Emisi Dengan Bahan Bakar LNG pada Kapal
(Sumber: MAN)

DFDE dapat memanfaatkan *boil-off gas* (BOG) yang dikeluarkan dari tangki penampung LNG pada kapal LNG. Dengan menggunakan gas alam sebagai bahan bakar, kapal LNG dengan *Dual Fuel Diesel Engine* dapat mengurangi emisi karbon akibat faktor karbon gas alam yang lebih rendah dari bahan bakar minyak pada umumnya (Marine Environment Protection Committee, 2009).

Tabel 2.7 *Carbon Factor on Various Types of Fuels*

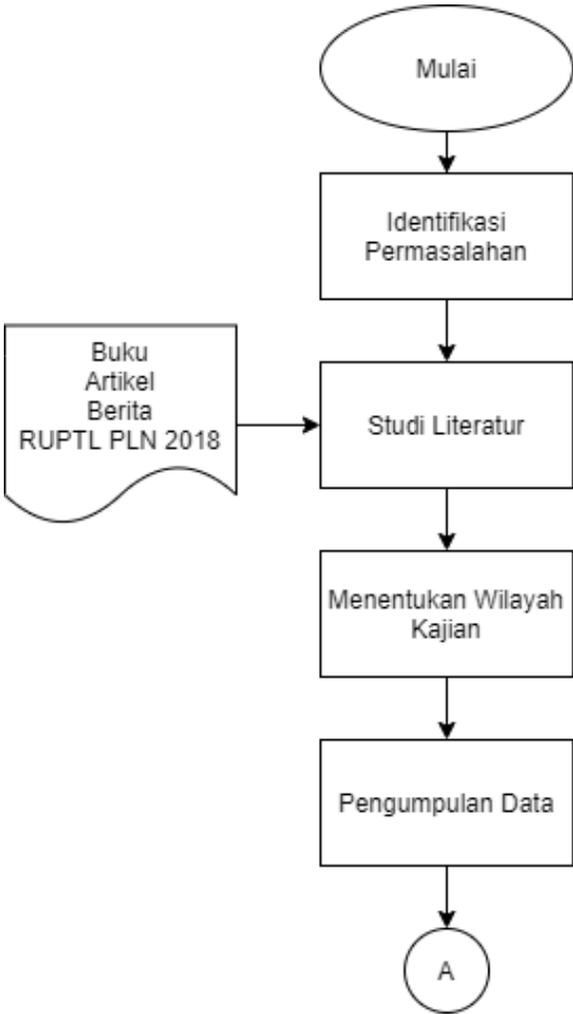
Type of Fuel	Reference	Carbon Content	Cf (t-CO ₂ /t-fuel)
Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0.875	3.206000
Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.86	3.151040
Heavy Fuel Oil	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.85	3.114400
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.819	3.000000
	Butane	0.827	3.030000
Liquefied Natural Gas (LNG)		0.75	2.750000

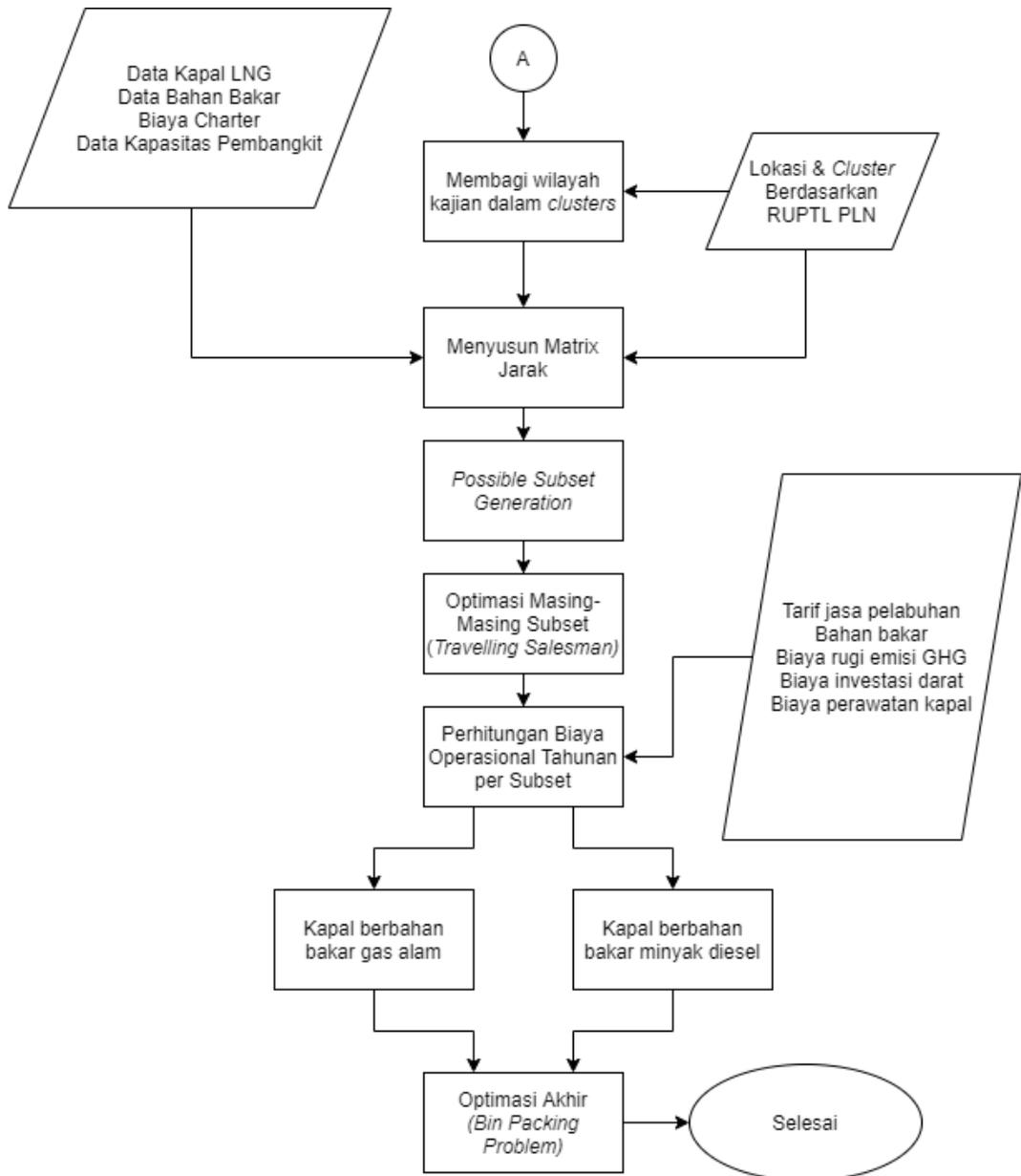
(Sumber: IMO - EEOI *Guideline*)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Flowchart Pengerjaan





Gambar 3. 1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir

3.2. Identifikasi Masalah

Pada Pada tahap ini, dilakukan analisa terhadap kondisi eksisting untuk mengetahui adanya permasalahan yang dapat diangkat dan layak untuk diselesaikan sebagai tugas akhir. Identifikasi Masalah dapat dilakukan melalui observasi, penggalian informasi, atau berdasarkan data statistika saat ini dan tren masa depan.

Pada tugas akhir ini, masalah yang akan diangkat adalah distribusi *LNG* dalam rangka pemenuhan peningkatan kebutuhan listrik luar jawa dan mendukung peningkatan penggunaan gas alam untuk keperluan domestik sesuai Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN).

Selain itu, tugas akhir ini juga akan mengangkat isu perubahan iklim dan pemanasan global yang telah menjadi tren masa depan dalam Industri maritim. Dengan melakukan *merging* terhadap metode-metode yang akan digunakan, diharapkan tugas akhir ini mampu menyelesaikan kedua permasalahan yang menjadi latar belakang tersebut.

3.3. Menentukan Obyek Penelitian

Obyek penelitian dari permasalahan yang dimiliki sangat banyak. Oleh karena itu, penulis menentukan obyek yang lebih spesifik untuk dapat dijadikan obyek penelitian. Pada tahap ini, penulis memutuskan untuk menjadikan wilayah Indonesia Timur sebagai obyek fokus dalam penelitian. Wilayah yang dijadikan obyek antara lain: kepulauan Maluku, Sulawesi Tenggara, dan Nusa Tenggara Timur. Dengan pasokan gas dari kilang blok Masela dengan *on-shore storage* di Saumlaki.

3.4. Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan pembelajaran mengenai semua hal yang perlu diketahui dalam rangka menyelesaikan masalah yang diangkat. Tujuan dilakukannya studi literatur adalah supaya penulis mampu mendapatkan ide dan gagasan yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang diangkat. Studi literatur dilakukan dengan cara membaca berbagai sumber baik itu dari buku, tugas akhir sebelumnya, artikel pada jurnal internasional, *master thesis*, video, artikel berita, peta, *solver tutorial*, dan sumber lain-lain yang terkait..

3.5. Pengumpulan Data

Setelah melakukan studi literatur dan menemukan metode yang relevan dan dapat diselesaikan dengan kemampuan, waktu, dan fasilitas yang ada, akan dilakukan pengumpulan data yang diperlukan untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. Data-data yang diperlukan penulis antara lain: lokasi *LNG Refinery* dan *PLTMG* yang menjadi obyek, spesifikasi kapal mini-*LNG*, kebutuhan daya setiap *PLTMG* yang menjadi obyek, jarak tempuh antar *PLTMG* dan antara *PLTMG* dan *Refinery*, biaya operasional kapal, biaya bahan bakar, biaya labuh, dan lain-lain.

3.6. Klasterisasi Wilayah Kajian

PLTMG akan diklasterkan berdasarkan areanya masing-masing (Putra, Made Arya Satya Dharma Artana dan Handani, 2016). Klasterisasi dilakukan untuk menyederhanakan area optimasi. Klasterisasi pada tugas akhir ini akan dilakukan untuk membentuk tiga klaster yaitu klaster Sulawesi Tenggara, Nusa Tenggara Timur, dan Klaster Kepulauan Ambon dan Maluku selatan.

a. Pembentukan Rute, TSP, dan Perhitungan Biaya

Ukuran armada yang direncanakan menentukan berapa kapal mini-LNG yang harus disiapkan. Untuk itu, dilakukan pembentukan rute-rute yang nantinya akan diolah lagi menjadi subset sebagai input dari optimasi. Dalam tugas akhir ini, *feasible routes* akan berupa kumpulan *single routes*. Kumpulan rute tersebut adalah *subsets* yang akan menjadi input dari optimasi.

Setelah mendapatkan rute-rute tersebut, setiap rute akan dicari urutan terminal yang akan dilayani yang paling optimal. Ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan *Travelling Salesman Problem* (TSP). Setelah didapatkan jarak minimal untuk setiap rute, dilakukan perhitungan biaya operasional yang dilakukan dengan komponen biaya seperti investasi darat, sewa kapal, operasional, dan biaya emisi karbon. Selain itu, biaya operasional setiap kapal akan dilakukan dalam 2 alternatif penggerak utama yaitu mesin diesel konvensional dan mesin diesel *dual-fuel*.

3.7. Optimasi Rute Dengan G-SRP menggunakan Bin Packing Problem

Optimasi rute dilakukan menggunakan prinsip G-SRP dengan bantuan *Bin Packing Problem*. Parameter yang menjadi acuan untuk optimasi rute adalah biaya operasional, biaya sewa kapal, dan biaya emisi CO₂ kapal yang mengacu kepada *CO₂ Marginal Damage Cost*. Berikut adalah

x_{ij} bernilai 1 apabila *subset i* dipilih, dan bernilai 0 jika tidak. y_{ij} bernilai 1 apabila *subset i* melayani pembangkit *j*, dan bernilai 0 jika tidak. Nilai c_{ij} adalah kapasitas kapal *j* pada subset *i*. w_i adalah jumlah LNG yang harus diangkut untuk memenuhi *demand* pada suatu *subset* selama satu periode *round trip t*. Jika C adalah biaya total, E adalah emisi, p adalah *CO₂ marginal damage cost*, I adalah himpunan *subsets* (*alternative routes*) yang ada dan J adalah himpunan alternatif kapal yang ada, maka:

Minimize:

$$z = \sum_{i=1}^n x_i (C_i + E_i \times p) \quad (3.1)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n (w_j y_{ij} t_i) \leq c_i x_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} = 1 \quad \forall j \in J, \quad (3.3)$$

$$x_{ij} = \{0,1\}, y_{ij} = \{0,1\}, i \in I, j \in J \quad (3.4)$$

C = Total Biaya Operasional

E_i = Total Emisi CO₂ pada *subset i*

p = CO₂ *Marginal Damage Cost*

z = Total biaya keseluruhan *subsets* yang terpilih

x_i = Variable Keputusan. Nilai 1 jika *subset i* dipilih, 0 jika tidak

y_{ij} = 1 jika *subset i* melayani pembangkit *j*, 0 jika tidak

I = Himpunan *Subsets*

J = Himpunan Pembangkit

- c_i = Kapasitas angkut subset i
 w_j = Demand harian terminal j
 t_i = Waktu pelayaran dalam hari yang dibutuhkan oleh subset i

Persamaan (3.1) merupakan fungsi obyektif untuk meminimalkan total biaya dan emisi dari seluruh subset yang terpilih. Persamaan (3.2) memastikan bahwa total demand LNG di subset yang terpilih tidak melebihi kapasitas kapal yang mengangkut. Persamaan (3.3) memastikan bahwa setiap PLTMG dilayani oleh satu LNG Carrier. Persamaan (3.4) memastikan bahwa nilai decision variable adalah binary integer. Model diatas dapat penulis susun didalam spreadsheet kemudian diselesaikan menggunakan add-on excel solver seperti contoh berikut:

	Routes	Capacity	Op. Cost/day	Total Op Cost/Round Trip	1	2	3	4	Time 1 Round Trip (by TSP)	Round Trips/Year	Route Demands	xi	Cost/Year	Carried Amount
1	0-1-0	10000	10	30	1	0	0	0	3	122	1200	0	0	0
2	0-2-0	10000	10	30	0	1	0	0	3	122	900	0	0	0
3	0-3-0	10000	10	30	0	0	1	0	3	122	750	0	0	0
4	0-4-0	10000	10	30	0	0	0	1	3	122	1800	0	0	0
5	0-1-2-0	10000	10	60	1	1	0	0	6	61	4200	0	0	0
6	0-1-3-0	10000	10	60	1	0	1	0	6	61	3900	0	0	0
7	0-1-4-0	10000	10	60	1	0	0	1	6	61	6000	1	3660	6000
8	0-2-3-0	10000	10	60	0	1	1	0	6	61	3300	1	3660	3300
9	0-2-4-0	10000	10	90	0	1	0	1	9	41	8100	0	0	0
10	0-3-4-0	10000	10	90	0	0	1	1	9	41	7650	0	0	0
11	0-1-2-3-0	10000	10	90	1	1	1	0	9	41	8550	0	0	0
12	0-1-2-4-0	10000	10	90	1	1	0	1	9	41	11700	0	0	0
13	0-1-3-4-0	10000	10	90	1	0	1	1	9	41	11250	0	0	0
14	0-2-3-4-0	10000	10	90	0	1	1	1	9	41	10350	0	0	0
15	0-1-2-3-4-0	10000	10	120	1	1	1	1	12	31	18600	0	0	0
Total Cost/Year													7320	

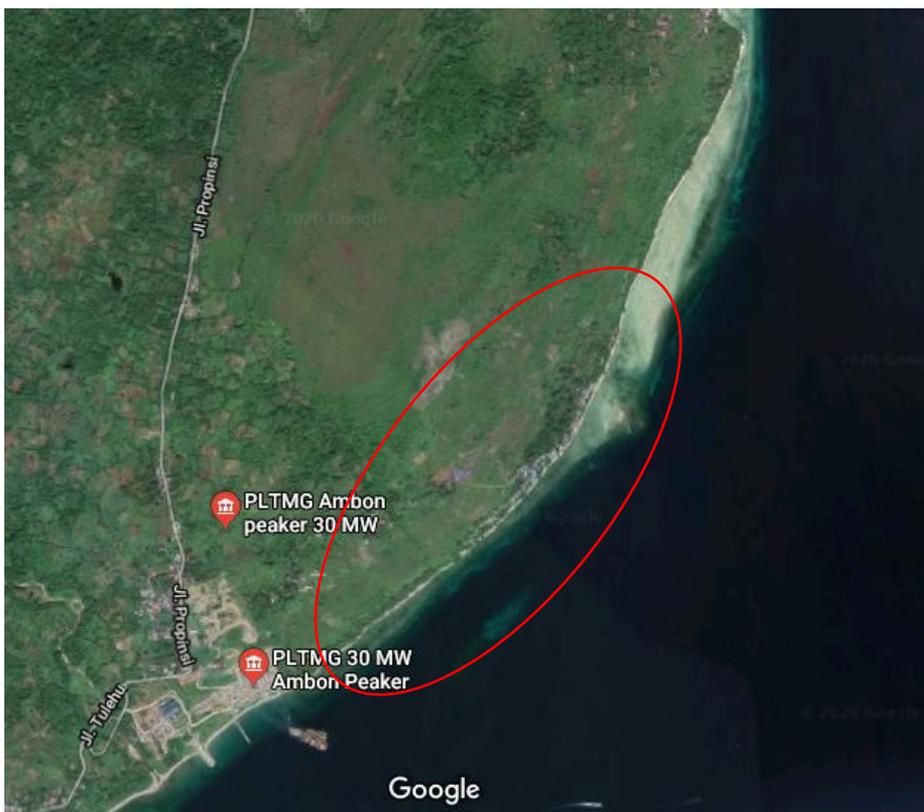
Gambar 3. 2 Contoh Spreadsheet Model Bin Packing Problem Sederhana untuk VRP

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Klasterisasi Obyek Jaringan Distribusi

Per November 2019, informasi terbaru terkait penetapan lokasi fasilitas logistik penyimpanan LNG Masela masih belum ditetapkan. Berita terbaru menyebutkan bahwa lokasi *on-shore storage* masih dalam tahap tender. Meski demikian, ada juga wacana bahwa lokasi fasilitas penyimpanan akan berada di Ambon, provinsi Maluku. Oleh karena itu, Lokasi yang akan diasumsikan sebagai *Hub* pada tugas akhir ini adalah *on-shore LNG storage* yang akan berada di Ambon. Lokasi *on-shore storage* di Ambon diasumsikan berada di dekat PLTMG Ambon Peaker seperti pada gambar.

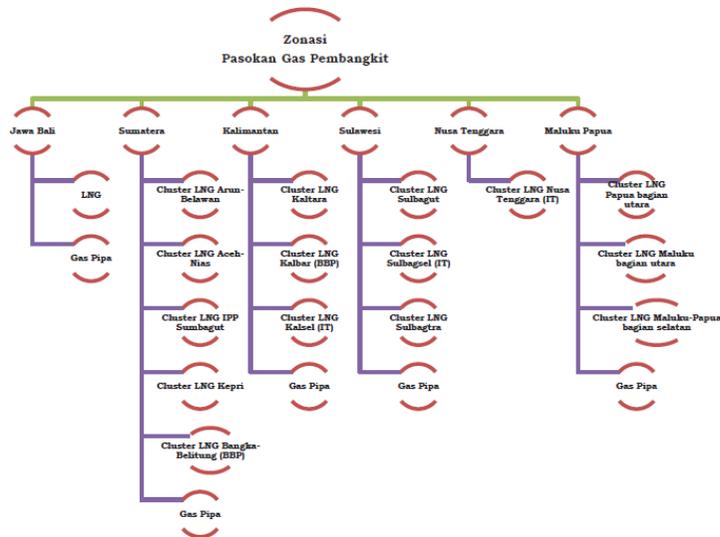


Gambar 4.1 Lokasi *Google Earth* dari *On-Shore Storage*



Gambar 4.2 Lokasi *google earth* dari *hub* distribusi

Klasterisasi pada wilayah kajian dilakukan berdasarkan RUPTL PLN 2018-2027 yang membagi klaster-klaster tersebut berdasarkan keputusan zonasi yang dikeluarkan oleh PLN. Seperti yang tertera didalam RUPTL, zonasi tersebut bertujuan untuk mencapai keandalan pasokan yang optimal terhadap efisiensi biaya. Selain itu, zonasi juga bertujuan untuk merancang beberapa *hub* yang nantinya akan dipakai untuk menunjang distribusi. Gambar dibawah ini adalah rincian pembagian wilayah (zonasi) dari pembangkit-pembangkit yang ada di Indonesia.

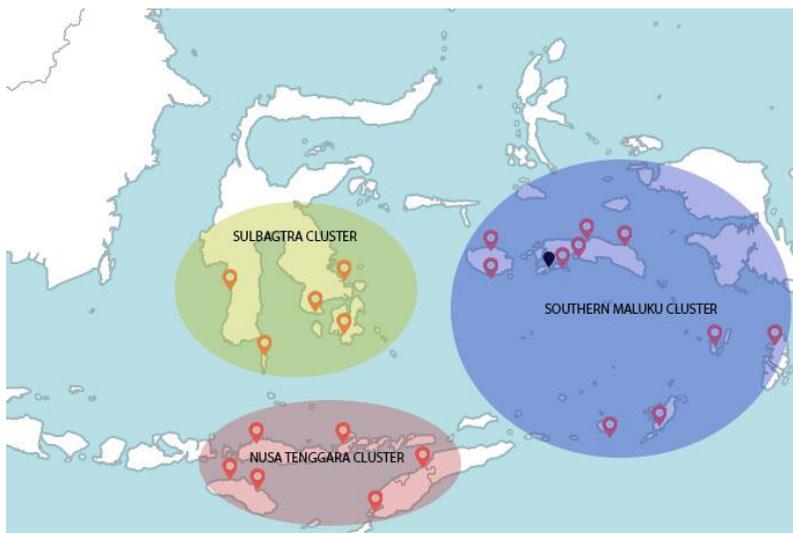


Gambar 4.3 Zonasi wilayah pembangkit
(Sumber: PLN, 2018)

Kemudian, titik-titik yang akan dilayani total ada 23 titik. Visualisasi titik-titik terminal tersebut dapat dilihat pada gambar 31 dibawah.



Gambar 4.4 Titik-titik demand yang akan dilayani



Gambar 4.5 Klasterisasi Wilayah Kajian Berdasarkan RUPTL PLN

Kemudian seluruh titik tersebut dibagi menjadi tiga wilayah kajian yang berikutnya akan disebut klaster. Klasterisasi dilakukan berdasarkan pembagian wilayah administratif yang sudah ditetapkan pada RUPTL PLN 2018-2027. Klasterisasi wilayah kajian dilakukan dengan membagi wilayah kajian menjadi klaster Sulbagtra (Sulawesi Bagian Tenggara), Nusa Tenggara, dan Maluku Selatan.

4.2 Kapasitas PLTMG dan Perhitungan Demand

Untuk menentukan rute yang optimal, perlu diketahui terlebih dahulu besar kebutuhan gas alam pada tiap-tiap pembangkit yang akan dilayani. Pembangkit-pembangkit yang pada tugas akhir ini akan dilayani adalah semua pembangkit yang sudah ada, dalam pembangunan, dan dalam perencanaan. Data pembangkit listrik diambil dari RUPTL PLN 2018-2027.

Dari kapasitas pembangkit yang ada kemudian dilakukan perhitungan mengenai kebutuhan LNG per harinya. Perhitungan dilakukan dengan nilai-nilai konversi yang didapat dari kuliah Teknologi LNG di Departemen Teknik Sistem Perkapalan yaitu:

1 tonne of LNG	= 52 mmBtu
	= 1.3 tonne of Crude Oil
	= 9.0 bbl of Crude Oil
1 MTPA of LNG	= 130mmscf/d of sales Gas
	= 150mmscf/d of Wellhead Gas
10 MMSCFD	= 180 TPD LNG
1 Tonne LNG	= 2-2.2 m ³ LNG
1 m ³ LNG	= 600 M3 natural gas
100 MW	= 20 MMSCFD natural gas
1MMSCF	= 35 m ³ LNG
	= 18 Tonne LNG
	= 940 mmbtu

Dengan rasio-rasio berikut;

$$\frac{MMSCFD}{MW} = \frac{20}{100} = 0.2$$

$$\frac{TPD}{MMSCFD} = \frac{180}{10} = 18$$

$$\frac{m^3}{ton} = \frac{2}{1} = 2$$

Maka dapat dihitung, rasio konversi r untuk menghitung kebutuhan LNG per hari dari sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas adalah:

$$r = \frac{MMSCFD}{MW} \times \frac{TPD}{MMSCFD} \times \frac{m^3}{Ton} = 7.2$$

Tabel 4.1 Perhitungan Kebutuhan Gas PLTMG

DEMAND LNG				
<i>EASTERN NUSA TENGGARA CLUSTER</i>			KEBUTUHAN LNG PER HARI	
Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)	r	m3 LNG/day
1	PLTMG Rote	6	7.2	43.2
2	PLTMG Waingapu	10	7.2	72
3	PLTMG Waitabula	10	7.2	72
4	MPP Flores	20	7.2	144
5	PLTMG Maumere	40	7.2	288
6	PLTMG Kupang 2	50	7.2	360
	PLTMG Kupang Peaker	40	7.2	288
7	PLTMG Timor 1	40	7.2	288
TOTAL		216	TOTAL	1555.2
<i>SULBAGTRA CLUSTER</i>				
Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)	m3 LNG/day	
1	PLTMG Kendari	50	7.2	360
2	MPP Bombana	10	7.2	72
3	MPP Bau-bau	30	7.2	216
4	MPP Kolaka Utara	5	7.2	36
5	PLTMG Selayar 1&2	20	7.2	144
TOTAL		115	TOTAL	828
<i>MALUKU CLUSTER</i>				
Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)	m3 LNG/day	
1	PLTMG Ambon Peaker	120	7.2	864
	PLTMG Ambon 2			
	PLTMG Ambon			
2	PLTMG Langgur	40	7.2	288
	PLTMG Langgur 2			
	PLTMG Langgur 3			
3	PLTMG Bula	10	7.2	72

(dilanjutkan)

Tabel 4.2 Perhitungan Kebutuhan Gas PLTMG (lanjutan)

4	PLTMG Namlea	20	7.2	144
	PLTMG Namlea 2			
5	PLTMG Saumlaki	20	7.2	144
	PLTMG Saumlaki 2			
6	PLTMG Dobo	20	7.2	144
	PLTMG Dobo 2			
7	PLTMG Seram	40	7.2	288
	PLTMG Seram 2			
8	PLTMG Seram Utara	20	7.2	144
9	PLTMG Saparua	5	7.2	36
10	PLTMG Namrole	10	7.2	72
11	PLTMG Masela	20	7.2	144
TOTAL		325	TOTAL	2340

Tabel tersebut menampilkan proyeksi kebutuhan gas setiap pembangkit yang akan dilayani. Seluruh nilai tersebut setelahnya akan digunakan sebagai nilai *demand* dari setiap titik yang dilayani dalam pelayaran. Dalam model optimasi, *demand* setiap pembangkit wajib untuk dipenuhi.

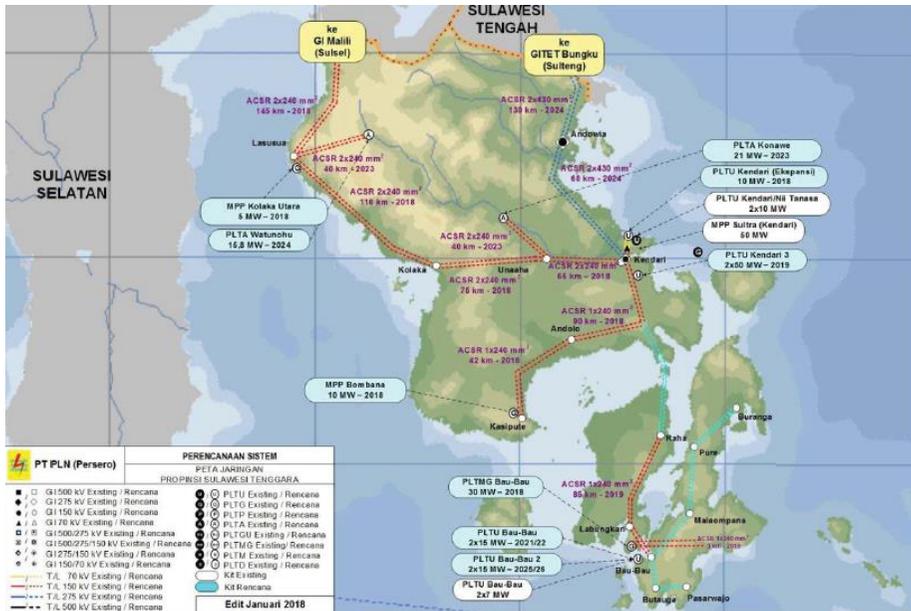
Safety stock dari terminal LNG pada tugas akhir ini diasumsikan sebesar setengah dari kapasitas yang dibutuhkan dalam rentang waktu pelayaran. Misalnya bila pelayaran memakan waktu 2 hari, maka *safety stock* pada setiap terminal dalam pelayaran tersebut adalah 1 hari dan begitu seterusnya. Sehingga dalam perhitungan *demand route* nanti, kebutuhan tiap terminal akan dijumlahkan dengan *safety stock*-nya masing-masing.

4.3 Data Lokasi PLTMG dan Klasterisasi

Geografi dari kepulauan di Indonesia Timur adalah pegunungan sehingga penggunaan pipa di darat sebagai media distribusi gas alam sulit dan membutuhkan biaya investasi yang sangat besar. Pada tugas akhir ini diasumsikan setiap titik PLTMG memiliki fasilitas penerima dan regasifikasi LNG untuk menunjang operasionalnya sendiri. Data lokasi didapatkan dari RUPTL PLN 2018-2027.

4.2.1. Cluster Sulawesi Tenggara

Cluster Sulawesi Tenggara memiliki 6 pembangkit yang akan dilayani melalui 5 terminal penerima. Gambar pertama menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di wilayah Sulawesi tenggara. Gambar ke-dua menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di Pulau Selayar.



Gambar 4.6 Sebaran Pembangkit di Wilayah Sulawesi Tenggara (Sumber: PLN, 2018)

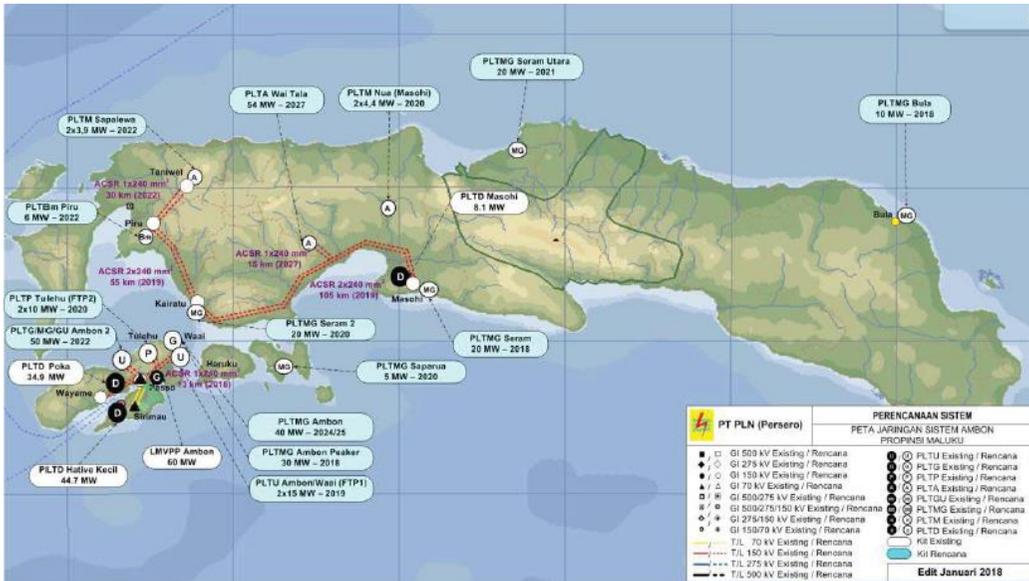


Gambar 4.7 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Selayar (Sumber: PLN, 2018)

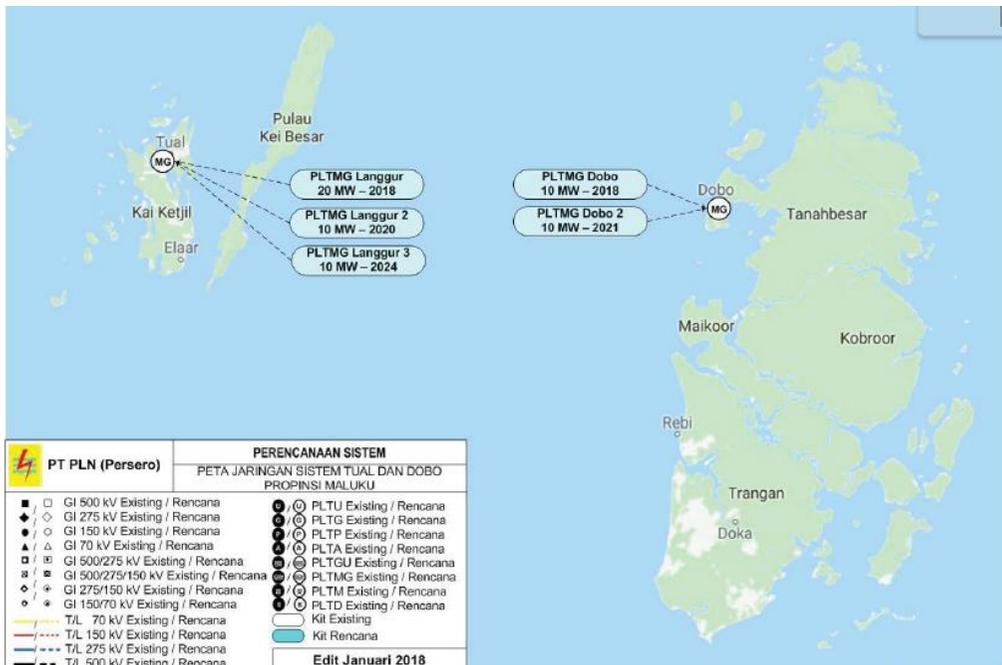
4.2.2. Cluster Maluku

Cluster Maluku memiliki 19 pembangkit yang akan dilayani melalui 10 terminal penerima. Gambar pertama menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di wilayah Ambon dan Pulau Seram. Gambar ke-dua menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di wilayah Langgur-Dobo. Gambar ke-tiga menunjukkan sebaran pembangkit yang dilayani di wilayah Pulau Yamdena-Masela. Gambar ke-empat menunjukkan pembangkit yang dilayani di wilayah Pulau Buru.

ter



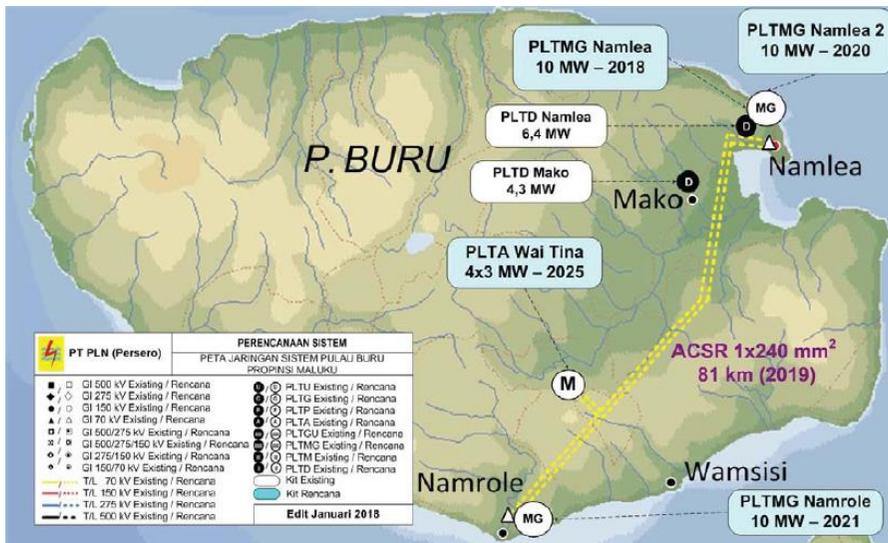
Gambar 4.8 Sebaran Pembangkit di Wilayah Ambon dan Seram (Sumber: PLN, 2018)



Gambar 4.9 Sebaran Pembangkit di Wilayah Langgur-Dobo (Sumber: PLN, 2018)



Gambar 4.10 Sebaran Pembangkit di Wilayah Yamdena-Masela
(Sumber: PLN, 2018)



Gambar 4.11 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Buru
(Sumber: PLN, 2018)

4.2.3. Cluster Nusa Tenggara Timur

Cluster Sulawesi Tenggara memiliki 8 pembangkit yang akan dilayani melalui 8 terminal penerima. Gambar pertama menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di wilayah Pulau Flores. Gambar ke-dua menunjukkan sebaran pembangkit

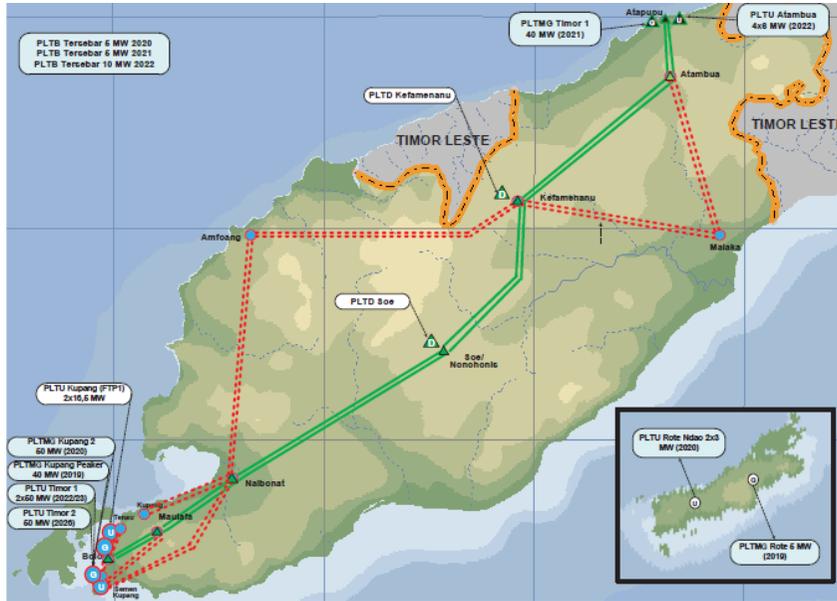
yang akan dilayani di Pulau Sumba. Gambar ke-tiga menunjukkan sebaran pembangkit yang akan dilayani di Pulau Timor.



Gambar 4.12 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Flores
(Sumber: PLN, 2018)



Gambar 4.13 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Sumba
(Sumber: PLN, 2018)



Gambar 4.14 Sebaran Pembangkit di Wilayah Pulau Timor
(Sumber: PLN, 2018)

4.4 Matriks Jarak

Pengukuran jarak antar titik dilakukan menggunakan bantuan aplikasi *Google Maps*. Tepatnya dengan menggunakan fitur *polyline* yang tersedia pada aplikasi tersebut. Kemudian, seluruh jarak antar setiap titik dijadikan dalam sebuah matriks berukuran $n \times n$ dengan n adalah jumlah terminal penerima dan *hub*. Matriks tersebut kemudian akan disebut sebagai matriks jarak dari *cluster* yang sedang dianalisa.

Tabel 4.3 Matriks Jarak Cluster Maluku dalam km

Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)
hub	PLTMG Ambon Peaker	120
	PLTMG Ambon 2	
	PLTMG Ambon	
1	PLTMG Langgur	40
	PLTMG Langgur 2	
	PLTMG Langgur 3	
2	PLTMG Bula	10
3	PLTMG Namlea	20
	PLTMG Namlea 2	
4	PLTMG Saumlaki	20
	PLTMG Saumlaki 2	
5	PLTMG Dobo	20

Lanjutan tabel 4.3

		PLTMG Dobo 2									
6		PLTMG Seram						40			
		PLTMG Seram 2									
7		PLTMG Seram Utara						20			
8		PLTMG Saparua						5			
9		PLTMG Namrole						10			
10		PLTMG Masela						20			
x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	550	406	159	688	710	73	300	48	190	537
1	550	0	382	681	235	188	500	522	505	710	430
2	406	382	0	397	557	512	360	150	357	568	593
3	159	681	397	0	638	858	220	263	203	122	625
4	688	235	557	638	0	397	700	789	690	845	188
5	710	188	512	858	397	0	664	667	666	871	551
6	73	500	360	220	700	664	0	392	51	257	545
7	300	522	150	263	789	667	392	0	334	343	751
8	48	505	357	203	690	666	51	334	0	232	514
9	190	710	568	122	845	871	257	343	232	0	594
10	537	430	593	625	188	551	545	751	514	594	0

Tabel 4.4 Matriks Jarak Cluster Sulawesi Tenggara dalam km

Terminal	Pembangkit						Kapasitas (MW)	
1	PLTMG Kendari						50	
2	MPP Bombana						10	
3	MPP Bau-bau						30	
4	MPP Kolaka Utara						5	
5	PLTMG Selayar 1&2						20	
Matriks Jarak Pembangkit <i>CLUSTER</i> SULAWESI TENGGARA								
	0	1	2			3	4	5
0	0	665	737			742	895	937
1	665	0	188			215	493	438
2	737	188	0			210	420	435
3	742	215	210			0	268	283
4	895	493	420			268	0	284
5	937	438	435			283	284	0

Tabel 4.5 Matriks Jarak Cluster NTT

EASTERN NUSA TENGGARA CLUSTER			KEBUTUHAN LNG PER HARI					
Terminal	Pembangkit	Kapasitas (MW)	r	m3 LNG/day				
1	PLTMG Rote	6	7.2	43.2				
2	PLTMG Waingapu	10	7.2	72				
3	PLTMG Waitabula	10	7.2	72				
4	MPP Flores	20	7.2	144				
5	PLTMG Maumere	40	7.2	288				
6	PLTMG Kupang 2	50	7.2	360				
	PLTMG Kupang Peaker	40	7.2	288				
7	PLTMG Timor 1	40	7.2	288				
TOTAL		216	TOTAL	1555.2				
Matriks Jarak Pembangkit <i>CLUSTER</i> NUSA TENGGARA TIMUR								
x	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	1079	1280	1210	1079	1027	907.53	721
1	1079	0	390	495	535	434	20	302
2	1280	390	0	99	192	460	390	497
3	1210	495	99	0	140	437	471	595
4	1079	535	192	140	0	276	567	590
5	1027	434	460	437	276	0	388	310
6	907.53	20	390	471	567	388	0	228
7	721	302	497	595	590	310	228	0

4.5 Screening alternatif LNG carriers

Untuk memastikan bahwa kapal dapat dioperasikan pada perairan, maka dilakukan *screening* awal dengan cara pendekatan. Kemampuan operasional dinilai berdasarkan keselamatan pelayaran yang dipengaruhi oleh tinggi gelombang.

Untuk tugas akhir ini, digunakan pendekatan batas aman tinggi gelombang yang tidak boleh lebih dari 30% lebar maksimal kapal (B). Kemudian, tinggi gelombang pada perairan diambil dari data yang dikeluarkan oleh Pusat Meteorologi Maritim, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (PMM-BMKG).

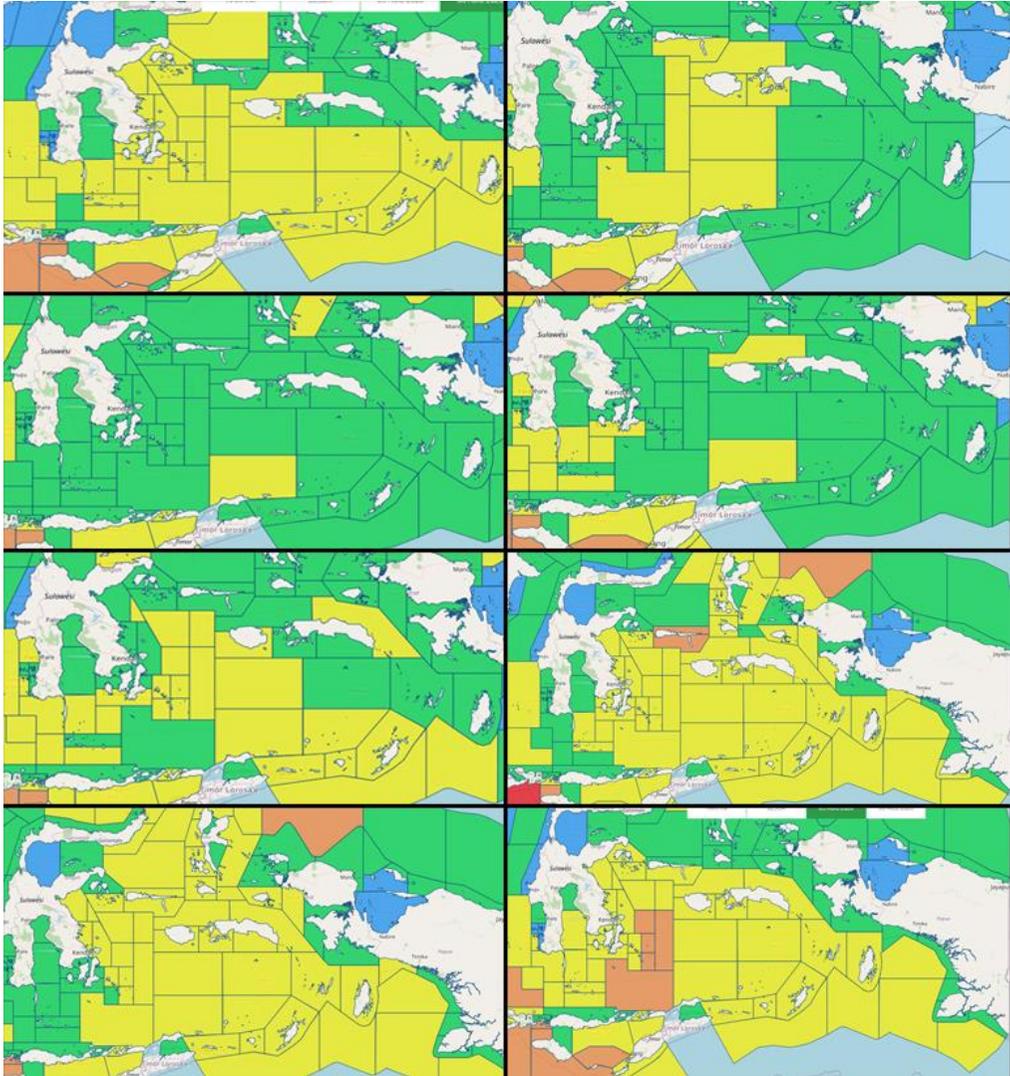
Tabel 4.6 Batas aman tinggi gelombang masing-masing tipe kapal

Alternatif kapal	B (m)	Batas aman tinggi gelombang (m)
A	11.83	3.549
B	15.1	4.53
C	18.6	5.58
D	20	6
E	28	8.4

Kemudian, batas-batas tersebut akan disesuaikan dengan wilayah pelayaran. Kumpulan peta (lihat gambar 43) menunjukkan tinggi gelombang dalam 8 waktu berbeda pada wilayah pelayaran armada. Sedangkan gambar no. 42 dibawah ini menunjukkan legenda pada data tinggi gelombang.

Tabel 4.7 Kategori dan tinggi gelombang di wilayah pelayaran

Kategori Gelombang	Tinggi Gelombang	Warna
Tenang	0.1 – 0.5 m	Biru
Rendah	0.5 – 1.25 m	Hijau
Sedang	1.25 – 2.50 m	Kuning
Tinggi	2.5 – 4.0 m	Jingga
Sangat Tinggi	4.0 – 6.0 m	Merah
Ekstrem	6.0 – 9.0 m	Ungu



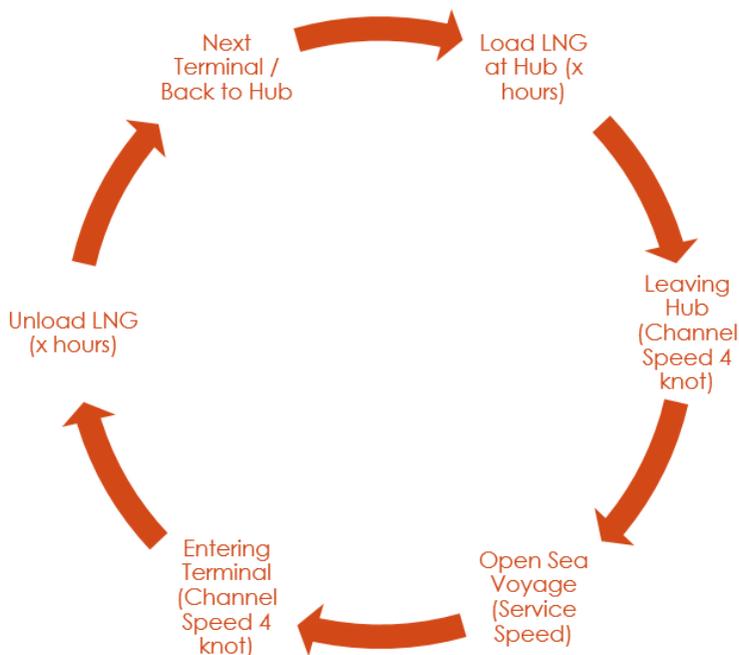
Gambar 4.15 Tinggi gelombang perairan wilayah pelayaran
(Sumber: Maritim BMKG, 2020)

Menurut data tersebut, kapal tipe B, C, D, dan E mampu melayani seluruh wilayah perairan. Sedangkan untuk kapal tipe A, ada beberapa rute yang tidak dapat dilayani. Rute yang tidak dapat dilayani oleh kapal tipe A adalah seluruh rute yang ada di *cluster* Sulbagtra dan *cluster* Nusa Tenggara Timur. Kapal tipe A masih mampu melayani *cluster* Maluku Selatan. Untuk itu, kapal tipe A tidak akan diikutsertakan dalam pemilihan armada untuk *cluster* 1 dan 2.

Sedangkan untuk batasan sarat, semua kapal dinyatakan mampu melayani semua terminal dikarenakan adanya fasilitas *jetty* yang akan dibangun untuk menunjang pelayaran.

4.6 Model Operasional Kapal

Untuk dapat menghitung total biaya operasional tahunan seluruh armada, maka perlu diasumsikan model operasional yang akan diterapkan pada armada tersebut. Model operasional pada pelayaran ini mengikuti jenis *liner* dimana biaya akan dihitung dalam satuan biaya / trip. Kemudian, biaya per-trip dikalikan dengan jumlah trip satu tahun untuk menghitung biaya operasional pertahun dari pelayaran. Untuk itu, diterapkan model operasional seperti pada gambar dibawah sebagai dasar perhitungan biaya yang akan dilakukan di subbab berikutnya.



Gambar 4.16 Model operasional kapal pada armada

Untuk lebih jelasnya, model operasional yang digunakan sebagai dasar perhitungan biaya adalah:

1. *Loading LNG* dan *deballasting* di terminal *hub* (Ambon). Kegiatan *loading* ini diasumsikan memakan waktu maksimal 12 jam.
2. Meninggalkan terminal *hub* dengan kecepatan pelabuhan maksimal 4 knot. Pembatasan kecepatan diasumsikan berlaku sejauh 4 nMiles dari *jetty* muat di terminal *hub*.

3. Pelayaran laut lepas dilakukan pada kecepatan dinas masing-masing kapal. Kecepatan dinas diasumsikan adalah kecepatan yang paling optimal dari segi pembebanan *engine* pada kapal.
4. Memasuki kolam pelabuhan dengan kecepatan 4 knot sejauh 4 nMiles dari terminal bongkar di terminal penerima pada *demand point* yang dituju.
5. Melakukan aktivitas bongkar muatan dan *ballasting* dengan asumsi waktu maksimal 12 jam.
6. Berlayar menjauhi terminal dalam kecepatan maksimum 4 knot selama berada di area pelabuhan sejauh 4 nMiles.
7. Menuju *hub* / terminal selanjutnya dalam rute untuk dilayani jika ada.
8. Setelah terminal terakhir pada rute dilayani, kembali ke tahap satu.

4.7 Komponen Biaya

4.5.1 Biaya Rugi Emisi

Grafik di bawah adalah table data nilai statistic hasil dari penelitian yang dilakukan Richard S. J. Tol. Untuk discount rate 3%, modus dari MDC adalah \$2/tC, median adalah \$7/tC, dengan rata-rata \$16/tC. Dikarenakan wilayah Indonesia di khatulistiwa dimana efek gas rumah kaca lebih berdampak, diambil nilai persentil 90% dari data yaitu **\$35/tC**.

Tabel 4.8 Tabel Nilai Statistika MDC (\$/ton)

	<i>Mode</i>	<i>Mean</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>	<i>Median</i>	<i>90%</i>	<i>95%</i>
<u><i>Base</i></u>	1.5	93	-10	-2	14	165	350
<u><i>Author-weights</i></u>	1.5	129	-11	-2	16	220	635
<u><i>Peer-reviewed only</i></u>	5	50	-9	-2	14	125	245
<u><i>CoV = 0.5</i></u>	5	92	-1	2	17	160	345
<u><i>CoV = 1.5</i></u>	1.5	94	-25	-8	14	170	375
<u><i>No equity weights</i></u>	1.5	90	-8	-2	10	119	300
<u><i>Equity weights</i></u>	-0.5	101	-20	-2	54	250	395
<u><i>PRTP = 3% only</i></u>	1.5	16	-6	-2	7	35	62
<u><i>PRTP = 1% only</i></u>	4.7	51	-14	-2	33	125	165
<u><i>PRTP = 0% only</i></u>	6.9	261	-24	-2	39	755	1610

(Sumber: Tol, 2005)

Tabel 4.9 Carbon Factor bahan bakar

Type of Fuel	Reference	Carbon Content	Cf (t-CO ₂ /t-fuel)
Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0.875	3.206000
Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.86	3.151040
Heavy Fuel Oil	ISOL 8217 Grades RME through RMK	0.85	3.114400
Liquified Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.819	3.000000
	Butane	0.827	3.030000
Liquified Natural Gas (LNG)		0.75	2.750000

(Sumber: Marine Environment Protection Committee, 2009)

Sementara itu, perhitungan besar ton CO₂ yang diemisikan dapat mengacu ke nilai faktor karbon pada tabel di atas. Dengan mengalikan nilai faktor karbon dengan jumlah bahan bakar yang digunakan, maka didapatkan besar massa CO₂ yang diemisikan.

4.5.2 Biaya Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada kapal mini-LNG tergantung daripada jenis diesel yang digunakan. Pada studi ini, ada dua jenis diesel yang digunakan yaitu diesel konvensional dan diesel *dual fuel*. Diesel konvensional pada tugas akhir ini diasumsikan menggunakan bahan bakar *Marine Gas Oil* (MGO) yang dihitung berdasarkan biaya *bunker* yang dikeluarkan oleh *shipandbunker.com*. Untuk varian *dual fuel*, menurut *project guide* Wartsila 20df, bahan bakar yang digunakan adalah *Marine Diesel Fuel* (MDF) sebagai pilot fuel dan gas alam sebagai bahan bakar utama. Gas alam sebagai *bunker* disimpan di kapal dalam bentuk LNG. Harga *bunker LNG* yang diambil untuk skenario Tugas Akhir ini diambil dari artikel DNV-GL yaitu sebesar \$4 per mmBtu atau ekuivalen dengan \$186 per ton. Untuk harga minyak HSD adalah sebesar \$630 per ton.

Tabel 4. 10 Referensi biaya bahan bakar

Harga bahan bakar akhir Januari 2020		
Bahan Bakar	Nilai	Satuan
IFO 380/180	9,8/9,9	\$/mmBTU
	375/380	\$/ton
MGO 0,1% S	15,6	\$/mmBTU
	630	\$/ton
Gas TTF	4,0	\$/mmBTU(lhv)
	186	\$/ton
Crude oil Brent	11,8	\$/mmBTU
	452,6	\$/ton

(Sumber: DNV-GL, 2020)

Adapun perhitungan untuk konsumsi bahan bakar, ditetapkan skenario dan asumsi antara lain:

Untuk Diesel Konvensional:

$$\sum_{i=1}^n (2(SFOC \times 0.3MCR \times t_{i1}) + (SFOC \times 0.85MCR \times t_{i2})), i = I \quad (4.1)$$

Dimana I adalah *subset* kumpulan pelayaran dalam satu opsi *subset* dan i adalah satu pelayaran dari sebuah *subset*. Notasi t_{i1} menunjukkan durasi pelayaran pada masing-masing kolam pelabuhan dan notasi t_{i2} menunjukkan durasi pelayaran antar pelabuhan.

Untuk *Dual Fuel Diesel Engine*:

$$\sum_{i=1}^n (2((GOC \times 0.3MCR \times t_{i1}) + (SFOC_{GAS} \times 0.3 MCR \times t_{i1})) + ((GOC \times 0.85MCR \times t_{i2}) + (SFOC_{GAS} \times 0.85 MCR \times t_{i2}))), i = I \quad (4.2)$$

$$FC = \frac{MCR \times t \times FGC}{LHV} \quad (4.3)$$

$MCR = \text{Engine MCR Corresponds to Vessel (kW)}$

$LHV = \text{Lower Heating Value } \left(\frac{KJ}{kg} \right)$

$$FGC = \text{Specific Fuel Gas Consumption} \left(\frac{KJ}{kWh} \right)$$

$$FGC = \text{Specific Fuel Gas Consumption} \left(\frac{KJ}{kWh} \right)$$

$$SFOC = \text{Specific Fuel Oil Consumption} \left(\frac{g}{kWh} \right)$$

Tabel 4. 11 Data Pemanding Konsumsi Bahan Bakar mesin *Dual Fuel*

Fuel Consumption (Note 4)					
Total energy consumption at 100% load	kJ/kWh	8180	-	8370	-
Total energy consumption at 85% load	kJ/kWh	8390	-	8460	-
Total energy consumption at 75% load	kJ/kWh	8520	-	8550	-
Total energy consumption at 50% load	kJ/kWh	9130	-	9090	-
Fuel gas consumption at 100% load	kJ/kWh	8048	-	8222	-
Fuel gas consumption at 85% load	kJ/kWh	8219	-	8266	-
Fuel gas consumption at 75% load	kJ/kWh	8326	-	8359	-
Fuel gas consumption at 50% load	kJ/kWh	8862	-	8859	-
Fuel oil consumption at 100% load	g/kWh	3.2	194.6	197.2	3.6
Fuel oil consumption at 85% load	g/kWh	4.2	194.4	196.3	4.2
Fuel oil consumption at 75% load	g/kWh	4.7	195.3	197.2	4.6
Fuel oil consumption at 50% load	g/kWh	6.7	206.1	208	5.6

(Sumber: Wartsila, 2015)

4.5.3 Biaya Operasional Pelabuhan

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi besar tariff operasional pelabuhan sebagai bagian dari biaya rute. Semakin banyak terminal yang dilayani dalam sebuah rute, maka semakin besar pula biaya yang harus dikeluarkan sebagai tarif operasional pelabuhan. Selain jumlah terminal, ukuran kapal dan volume muatan yang dibongkar juga mempengaruhi tarif yang harus dikeluarkan. Semakin banyak terminal yang dilayani, tentunya akan semakin besar biaya operasional pelabuhan yang harus ditanggung.

Tabel 4. 12 Biaya Operasional Pelabuhan

Komponen Biaya	Satuan Tarif	Tarif
Jasa Tambat		
a. Dermaga	per GT	IDR 96.83
b. Breasting Dolphin	per GT	IDR 48.42
c. Pinggiran	per GT	IDR 30.58
Jasa Pandu		
a. Tarif Tetap	per Kapal per Gerakan	IDR 2,828,862.00
b. Tarif Variabel	per GT per Gerakan	IDR 122.25
Jasa Tunda		
1. Kapal s.d. 3500 GT		
a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 825,000.00
b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00
1. Kapal s.d. 3501 s.d. 8000 GT		
a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 1,430,000.00
b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00
1. Kapal s.d. 8001 s.d. 14000 GT		
a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 2,530,000.00
b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00

(Sumber: Kemenhub, 2010)

4.5.4 Biaya Investasi Darat

Ada beberapa biaya Investasi darat yang terdiri dari biaya fasilitas-fasilitas yang harus ada di terminal LNG guna menunjang operasional kegiatan bongkar muat, regasifikasi, dan penyimpanan. Pada tugas akhir ini diasumsikan bahwa seluruh fasilitas terminal bersifat *on-shore*.

Biaya Investasi di darat yang akan dianalisa pada tugas akhir ini adalah biaya pembangunan jetty untuk bongkar-muat dan biaya penyediaan tangki skid LNG dengan kapasitas 400 m³ untuk setiap tangkinya. Pengaruh kapal terhadap pemilihan

jetty adalah bertambahnya panjang jetty yang dibutuhkan untuk mengakomodasi kapal dengan LoA yang beragam. Oleh karena itu, untuk setiap kapal, kebutuhan *jetty* diprediksi sekitar 120% dari panjang kapal tersebut. Untuk menyederhanakan, dilakukan pembulatan terhadap panjang jetty menjadi sebagai berikut:

Tabel 4.13 Kebutuhan Jetty *Cluster* Sulbagtra

SULBAGTRA CLUSTER	Pembangkit	Panjang Minimal Jetty (m)				
		Kapal A	Kapal B	Kapal C	Kapal D	Kapal E
Terminal						
1	PLTMG Kendari	100	140	160	180	200
2	MPP Bombana	100	140	160	180	200
3	MPP Bau-bau	100	140	160	180	200
4	MPP Kolaka Utara	100	140	160	180	200
5	PLTMG Selayar 1&2	100	140	160	180	200

Tabel 4.14 Kebutuhan Jetty *Cluster* NTT

NTT CLUSTER	Pembangkit	Panjang Minimal Jetty (m)				
		Kapal A	Kapal B	Kapal C	Kapal D	Kapal E
Terminal						
1	PLTMG Rote	100	140	160	180	200
2	PLTMG Waingapu	100	140	160	180	200
3	PLTMG Waitabula	100	140	160	180	200
4	MPP Flores	100	140	160	180	200
5	PLTMG Maumere	100	140	160	180	200
6	PLTMG Kupang 2	100	140	160	180	200
7	PLTMG Kupang Peaker	100	140	160	180	200

Tabel 4. 15 Kebutuhan Jetty *Cluster* Maluku

NTT CLUSTER	Panjang Minimal Jetty (m)				
	Kapal A	Kapal B	Kapal C	Kapal D	Kapal E
1	100	140	160	180	200
2	100	140	160	180	200
3	100	140	160	180	200
4	100	140	160	180	200
5	100	140	160	180	200
6	100	140	160	180	200
7	100	140	160	180	200
8	100	140	160	180	200
9	100	140	160	180	200
10	100	140	160	180	200

Biaya pembangunan *jetty* pada tugas akhir ini didapatkan dari biaya per luasan tanah dikalikan dengan panjang dan lebar dari *jetty* tersebut. Biaya per meter persegi tanah ditetapkan yaitu sebesar Rp 50.000.000,- dimana biaya tersebut ditetapkan sudah mencakup semua jenis pembangunan. Sedangkan untuk tangki *storage LNG* ditetapkan sebesar \$800,000 setiap tangkinya yang berukuran 400 m³.(Setyorini, 2018) Dalam perhitungan biaya Investasi darat, diberlakukan perhitungan *Equivalent Annual Cost (EAC)* supaya biaya Investasi dapat dibandingkan dengan biaya operasional *annual* yang lain.

$$EAC = \frac{Asset\ Price \times Discount\ Rate}{1 - (1 + Discount\ Rate)^{-n}} \quad (4.1)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ rate &= 10\% \end{aligned}$$

Tabel 4. 16 Beberapa hasil perhitungan EAC pada *cluster 3*

Subs et	Route	Routes After TSP	Jetty Investment (\$)	Tank Investment (\$)	EAC (\$)
2	0-2-0	0-2-0	1121200	1600000	272119.09 09
2161	0-2-7-9-0	0-9-7-2-0	5381760	4800000	1018175.0 91
1070	0-6-8-0	0-6-8-0	3139360	2400000	553935.09 09
3130	0-1-2-8-0	0-8-2-1-0	6054480	10400000	1645447.0 91
3231	0-5-7-10-0	0-10-5-7-0	6054480	4800000	1085447.0 91
4315	0-1-3-8-10-0	0-8-1-10-3-0	8969600	12800000	2176959.0 91
4610	0-2-3-4-6-8-0	0-3-4-2-6-8-0	11212000	10400000	2161199.0 91

4.5.5 Biaya *Charter* Kapal berdasarkan kapal pembanding

Kapal yang digunakan pada tugas akhir ini adalah kapal *small-scale LNG* dengan ukuran 1100 m³, 2500 m³, 7500 m³, 10000 m³, dan 15600 m³. Kapal pembanding digunakan untuk menentukan biaya sewa dan mesin penggerak. Kapal pembanding yang digunakan adalah: Pioneer Kutsen, Shinju Maru, Coral Methane, Norgas Conception, dan Coral Energy. Rincian data teknis dan biaya *charter* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 17 Data Kapal Pembanding

Parameter	Unit	VALUE				
		SMALL LNG CARRIER				
Jenis Kapal	-					
Kapasitas	m ³	1100	2500	7500	10000	15600
LoA	m	69	86.25	117.8	130	151
Breadth	m	11.83	15.1	18.6	20	28
Draft	m	3.6	3.8	7.15	7.1	8
Kecepatan Dinas	knot	12.2	13	14	14	15
Engine Power @MCR	kW	1000	1676	4090	5297	8000
Biaya Sewa	USD/year	7800	10426	19806	24496	35000

4.5.6 Biaya perawatan dan reparasi

Salah lain biaya yang membedakan antara kedua tipe penggerak adalah biaya perawatan dan reparasi. Berdasarkan referensi dari powerpoint kuliah *Ship Design* oleh Prof. Manuel Ventura dari Instituto Superior Técnico (Ventura, 2005) (Bureau of Transport Economic, 1982), biaya perawatan dan reparasi diambil dari persamaan empiris berikut:

$$C_{M\&R} = k1 \times C_0 + k2 \times p_{MCR}^{0.66} \quad (4.2)$$

Dengan $C_{M\&R}$ adalah biaya pemeliharaan dan perawatan kapal, C_0 adalah biaya akuisisi kapal, $k1$ adalah konstanta dengan nilai 0.0035. dan p adalah daya mesin dalam satuan HP. Variabel $k2$ bernilai 125 untuk 4 stroke *Diesel Engine*(Ventura, 2005) dan 200 untuk *Dual Fuel Diesel Engine*.

4.8 Cluster Routes Generation: Sulawesi Tenggara

Penentuan seluruh *subsets* dilakukan dengan menggunakan bantuan modul iterasi dari Python. Dengan mengatur input dari seluruh terminal yang ada pada *cluster* Sulbagtra akan ditemukan kombinasi-kombinasi yang ada. Dengan jumlah kombinasi sebanyak 31 untuk setiap tipe kapal. Untuk lima tipe kapal ada total sebanyak 155 subset yang akan digunakan dalam proses optimasi. Pencarian rute-rute yang mungkin pada tugas akhir ini dibantu oleh modul *itertools* pada Bahasa Pemrograman Python (Lihat tabel 22). Kemudian, pada setiap *subset* diberlakukan *Travelling Salesman Problem* untuk menentukan jarak terpendek dari rute tersebut. Kalkulasi TSP dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Travelling Salesman Solver*. Selain itu, juga digunakan salah satu modul Bahasa Pemrograman Python yang bernama TSP pada *cluster* 3 yang memiliki jumlah subset yang jauh lebih banyak dari *cluster* satu dan dua. Hasil dari TSP adalah susunan titik yang dilayani supaya menghasilkan jarak terpendek yang mungkin dalam satu rute pelayaran. Rute yang sudah optimal menggunakan TSP kemudian akan digunakan sebagai *input* dari pemilihan menggunakan BPP.

Tabel 4.18 Possible Routes Cluster Sulawesi Tenggara

SULBAGTRA CLUSTER					
Subset	Route	Subset	Route	Subset	Route
1	0-1-0	11	0-2-4-0	21	0-1-4-5-0
2	0-2-0	12	0-2-5-0	22	0-2-3-4-0
3	0-3-0	13	0-3-4-0	23	0-2-3-5-0
4	0-4-0	14	0-3-5-0	24	0-2-4-5-0
5	0-5-0	15	0-4-5-0	25	0-3-4-5-0
6	0-1-2-0	16	0-1-2-3-0	26	0-1-2-3-4-0
7	0-1-3-0	17	0-1-2-4-0	27	0-1-2-3-5-0
8	0-1-4-0	18	0-1-2-5-0	28	0-1-2-4-5-0
9	0-1-5-0	19	0-1-3-4-0	29	0-1-3-4-5-0
10	0-2-3-0	20	0-1-3-5-0	30	0-2-3-4-5-0
				31	0-1-2-3-4-5-0

Tabel dibawah melampirkan rute atau *subset* sebelum dan sesudah proses TSP. Kolom total nMiles menunjukkan jarak tempuh akhir yang sudah dioptimalkan dengan

mengubah urutan terminal yang dilayani. Jarak tersebut yang akan menjadi *input* untuk perhitungan selanjutnya yang berkaitan dengan biaya operasional pelayaran.

Tabel 4.19 Hasil TSP Masing-Masing Jarak *Cluster* Sulbagtra

<i>Subset</i>	<i>Route</i>	<i>Routes After TSP</i>	1	2	3	4	5	<i>n</i> <i>Ports Served</i>	<i>Total km</i>	<i>Total nMiles</i>
1	0-1-0	0-1-0	1					1	1330	704.9
2	0-2-0	0-2-0		1				1	1474	781.22
3	0-3-0	0-3-0			1			1	1484	786.52
4	0-4-0	0-4-0				1		1	1790	948.7
5	0-5-0	0-5-0					1	1	1874	993.22
6	0-1-2-0	0-1-2-0	1	1				2	1590	842.7
7	0-1-3-0	0-1-3-0	1		1			2	1622	859.66
8	0-1-4-0	0-1-4-0	1			1		2	2053	1088.09
9	0-1-5-0	0-1-5-0	1				1	2	2040	1081.2
10	0-2-3-0	0-2-3-0		1	1			2	1689	895.17
11	0-2-4-0	0-2-4-0		1		1		2	2050	1086.5
12	0-2-5-0	0-2-5-0		1			1	2	2109	1117.77
13	0-3-4-0	0-3-4-0			1	1		2	1905	1009.65
14	0-3-5-0	0-3-5-0			1		1	2	1962	1039.86
15	0-4-5-0	0-4-5-0				1	1	2	2116	1121.48
16	0-1-2-3-0	0-1-2-3-0	1	1	1			3	1805	956.65
17	0-1-2-4-0	0-4-2-1-0	1	1		1		3	2168	1149.04
18	0-1-2-5-0	0-1-2-5-0	1	1			1	3	2225	1179.25
19	0-1-3-4-0	0-1-3-4-0	1		1	1		3	2043	1082.79
20	0-1-3-5-0	0-1-3-5-0	1		1		1	3	2100	1113
21	0-1-4-5-0	0-1-5-4-0	1			1	1	3	2282	1209.46
22	0-2-3-4-0	0-2-3-4-0		1	1	1		3	2110	1118.3
23	0-2-3-5-0	0-2-3-5-0		1	1		1	3	2167	1148.51
24	0-2-4-5-0	0-4-5-2-0		1		1	1	3	2295	1216.35
25	0-3-4-5-0	0-3-5-4-0			1	1	1	3	2284	1210.52
26	0-1-2-3-4-0	0-1-2-3-4-0	1	1	1	1		4	2226	1179.78
27	0-1-2-3-5-0	0-1-2-3-5-0	1	1	1		1	4	2283	1209.99
28	0-1-2-4-5-0	0-4-5-2-1-0	1	1		1	1	4	2467	1307.51
29	0-1-3-4-5-0	0-1-3-5-4-0	1		1	1	1	4	2342	1241.26
30	0-2-3-4-5-0	0-4-5-3-2-0		1	1	1	1	4	2409	1276.77
31	0-1-2-3-4-5-0	0-1-2-4-5-3-0	1	1	1	1	1	5	2582	1368.46

4.9 Cluster Routes Generation: Nusa Tenggara

Kemudian dilakukan proses yang sama untuk *cluster* Nusa Tenggara. Proses seleksi awal Pada *cluster* kedua ini, didapatkan jumlah kemungkinan rute sebanyak 127. Untuk 5 buah kapal didapatkan sebanyak 365 *possible subsets*. Berikut adalah rute yang mungkin dari *cluster 2* dan jaraknya setelah melalui proses TSP.

Tabel 4.20 Sebagian Hasil TSP Masing-Masing *Subset* di *Cluster* Nusa Tenggara

Subsets	Routes	Routes (After TSP)	Served Ports							Distance (km)
			1	0	0	0	0	0	0	
1	0-1-0	0-1-0	1	0	0	0	0	0	0	1079
3	0-3-0	0-3-0	0	0	1	0	0	0	0	1210
4	0-4-0	0-4-0	0	0	0	1	0	0	0	1079
5	0-5-0	0-5-0	0	0	0	0	1	0	0	1027
9	0-1-3-0	0-1-3-0	1	0	1	0	0	0	0	2784
10	0-1-4-0	0-1-4-0	1	0	0	1	0	0	0	2784
12	0-1-6-0	0-6-1-0	1	0	0	0	0	1	0	2006
13	0-1-7-0	0-7-1-0	1	0	0	0	0	0	1	2102
19	0-3-4-0	0-3-4-0	0	0	1	1	0	0	0	2429
37	0-1-3-7-0	0-7-1-3-0	1	0	1	0	0	0	1	2728
38	0-1-4-5-0	0-1-4-5-0	1	0	0	1	1	0	0	2917
47	0-2-3-7-0	0-7-2-3-0	0	1	1	0	0	0	1	2527
50	0-2-4-7-0	0-7-2-4-0	0	1	0	1	0	0	1	2489
56	0-3-4-7-0	0-7-3-4-0	0	0	1	1	0	0	1	2535
57	0-3-5-6-0	0-6-3-5-0	0	0	1	0	1	1	0	2842
59	0-3-6-7-0	0-7-3-4-0	0	0	1	0	0	1	1	2666
96	0-3-4-6-7-0	0-7-6-3-4-0	0	0	1	1	0	1	1	2639
97	0-3-5-6-7-0	0-7-6-3-5-0	0	0	1	0	1	1	1	2884
98	0-4-5-6-7-0	0-4-5-6-7-0	0	0	0	1	1	1	1	2692
100	0-1-2-3-4-6-0	0-4-3-2-1-6-0	1	1	1	1	0	1	0	2653
102	0-1-2-3-5-6-0	0-5-3-2-1-6-0	1	1	1	0	1	1	0	2880
104	0-1-2-3-6-7-0	0-7-3-2-1-6-0	1	1	1	0	0	1	1	2631
105	0-1-2-4-5-6-0	0-2-4-5-1-6-0	1	1	0	1	1	1	0	3109
116	0-2-3-4-6-7-0	0-7-6-2-3-4-0	0	1	1	1	0	1	1	2657
117	0-2-3-5-6-7-0	0-7-6-2-3-5-0	0	1	1	0	1	1	1	2902
127	0-1-2-3-4-5-6-7-0	0-7-5-4-3-2-1-6-0	1	1	1	1	1	1	1	2863

4.10 Cluster Routes Generation: Maluku

Demikian pula untuk *cluster* Maluku. Proses seleksi awal Pada *cluster* kedua ini, didapatkan jumlah kemungkinan rute sebanyak 1012 buah rute. Untuk 5 buah kapal didapatkan sebanyak 5104 *possible subsets* yang akan digunakan sebagai masukan model optimasi. Berikut adalah rute yang mungkin dari *cluster* 3 dan jaraknya setelah melalui proses TSP.

Tabel 4. 21 Sebagian Hasil TSP Masing-Masing *Subset* di *Cluster* Nusa Tenggara

Subset	Route	Routes After TSP	Total km	Total Days
2	0-2-0	0-2-0	812.3	2.08
3	0-3-0	0-3-0	318.54	1.19
4	0-4-0	0-4-0	1375	3.10
10	0-10-0	0-10-0	1074	2.56
31	0-3-7-0	0-3-7-0	722.17	2.48
32	0-3-8-0	0-3-8-0	410.48	1.91
33	0-3-9-0	0-3-9-0	471.27	2.02
38	0-4-8-0	0-4-8-0	1425.5	3.75
43	0-5-8-0	0-5-8-0	1424.47	3.75
138	0-3-8-9-0	0-3-9-8-0	561.27	2.74
1025	0-2-0	0-2-0	812.3	2.00
1026	0-3-0	0-3-0	318.54	1.16
1028	0-5-0	0-5-0	1420.14	3.03
1029	0-6-0	0-6-0	146	0.86
3705	0-5-7-8-9-10-0	0-9-7-5-10-8-0	2312.9	6.51
3895	0-3-4-5-7-8-9-0	0-9-3-7-5-4-8-0	2377.15	7.17
3903	0-3-4-7-8-9-10-0	0-9-3-7-4-10-8-0	2113.64	6.75
4151	0-1-2-6-0	0-6-1-2-0	1361.35	3.75
4435	0-3-6-7-10-0	0-6-10-7-3-0	1791.07	4.94
4437	0-3-6-8-10-0	0-6-8-10-3-0	1421.87	4.40
4866	0-2-3-4-6-7-8-0	0-3-7-2-4-6-8-0	1928.4	6.27
4867	0-2-3-4-6-7-9-0	0-9-3-7-2-4-6-0	2055.53	6.45
4868	0-2-3-4-6-7-10-0	0-6-10-4-2-7-3-0	1935.33	6.28
4869	0-2-3-4-6-8-9-0	0-9-3-4-2-6-8-0	1964.76	6.32
5047	0-2-4-5-6-7-9-10-0	0-9-7-2-5-4-10-6-0	2398.41	7.52
5048	0-2-4-5-6-8-9-10-0	0-8-6-2-5-4-10-9-0	2339.02	7.43
5050	0-2-4-6-7-8-9-10-0	0-9-7-2-4-10-8-6-0	2065.86	7.03

4.11 Optimasi akhir dengan formulasi Bin Packing Problem

a. Seleksi Rute *Feasible*

Setiap rute yang sudah dioptimasi tersebut belum tentu layak (*feasible*) untuk ditetapkan sebagai rute pilihan. Rute yang layak adalah rute yang dapat dipenuhi oleh

kapasitas kapal tersebut. Semakin banyak terminal yang dilayani, maka kapasitas yang dibutuhkan untuk mengangkut LNG di setiap *round trip* juga akan bertambah. Untuk itu, dilakukan koreksi silang antara kapasitas kapal dan kebutuhan minimal rute. Dalam hal ini, diasumsikan *safety stock* LNG pada setiap terminal adalah satu setengah dari konsumsi normalnya. Apabila kebutuhan rute tersebut lebih besar dari kapasitas kapal, maka rute atau *subset* tersebut dinyatakan sebagai *infeasible*. *Subset* yang *infeasible* tersebut kemudian dihilangkan dari proses optimasi berikutnya.

b. Pemilihan Kombinasi Subset

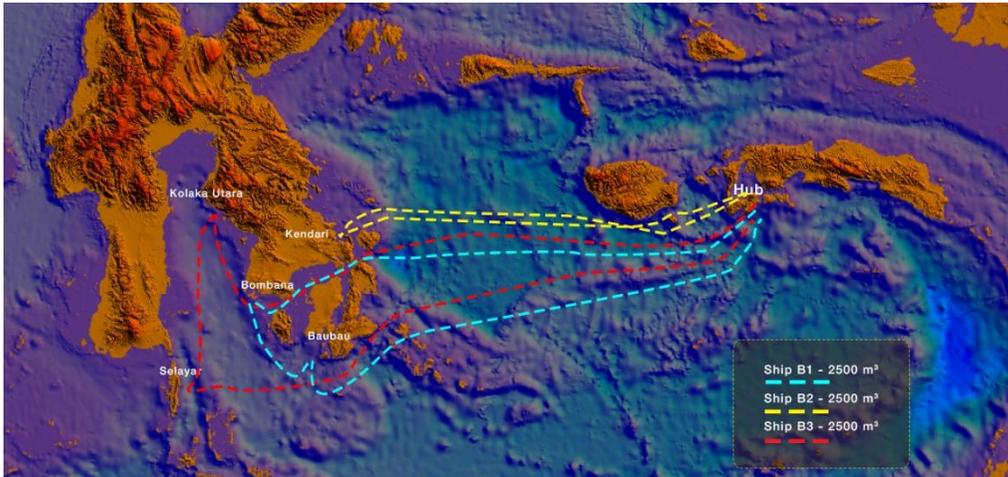
Setelah mendapatkan seluruh rute yang *feasible* maka dilakukan pemilihan dengan metode *bin packing* pada *subset-subset* yang ada. Pemilihan dilakukan menggunakan *open source excel add-on* yang bernama *open solver*. Dengan *open solver* dipilih kombinasi-kombinasi *subset* yang memenuhi *constraint* yang ada dan memberikan biaya operasional pelayaran tahunan yang minimal.

4.12 Hasil Optimasi

Untuk *cluster* 1, pilihan yang didapatkan melalui proses optimasi adalah kombinasi kapal dan rute yang memiliki biaya operasional per-tahun yang paling rendah. Kombinasi yang paling optimal adalah dengan menggunakan satu buah kapal jenis A dengan rute Ambon-Bombana-Kolaka Utara-Ambon. Selain itu juga menggunakan dua buah kapal jenis B dengan rute Ambon-Kendari-Ambon dan Ambon-Baubau-Selayar-Ambon. Dengan seluruh kapal menggunakan bahan bakar LNG. Biaya operasional tahunan minimum yang dibutuhkan untuk skenario tersebut adalah sebesar \$2,981,169.75.

Tabel 4.22 Hasil Optimasi Cluster 1

Cluster 1					
Subset	Rute	Kapal	Jarak Pelayaran (km)	Durasi Pelayaran (hari)	Muatan Diangkut selama durasi (m3)
196	0-2-3-0	B1	1689	4.04	1746.24
187	0-1-0	B2	1330	2.87	1552.33
201	0-4-5-0	B3	2116	4.77	1287.24
Subset	Kapasitas Kapal Maksimal (m3)	Load Factor	Kelayakan	Conventional Diesel Engine	Dual Fuel
196	1100	1.59	FEASIBLE	\$ 2,108,397.61	\$ 1,183,550.11
187	2500	0.62	FEASIBLE	\$ 1,979,794.12	\$ 958,331.06
201	2500	0.51	FEASIBLE	\$ 2,087,242.26	\$ 1,107,416.78
Total :				\$ 6,175,433.99	\$ 3,249,297.96



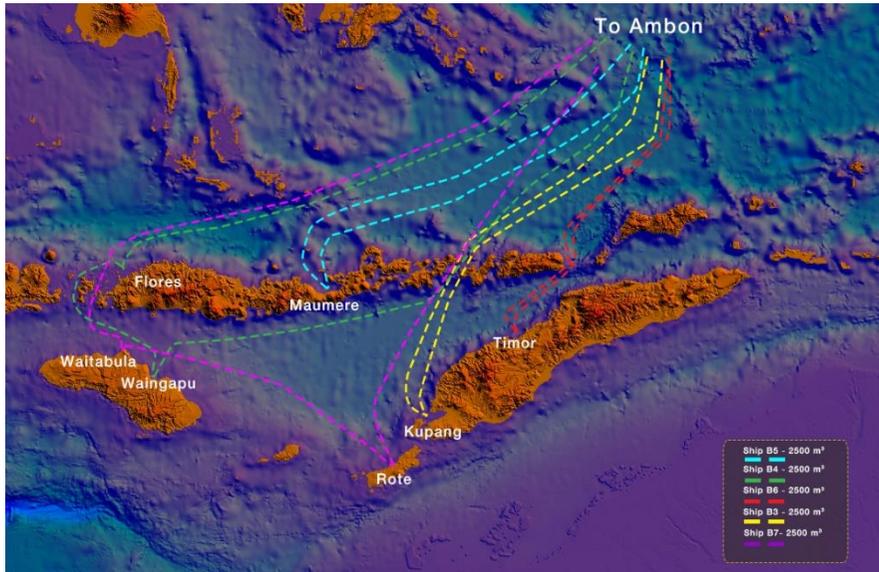
Gambar 4.17 Hasil Routing untuk Cluster 1

Tabel 4.23 Hasil Optimasi Cluster 2

Cluster 2					
Subset	Rute	Kapal	Jarak Pelayaran (km)	Durasi Pelayaran (hari)	Muatan Diangkut selama durasi (m3)
767	0-5-0	B5	1027	2.36	1019.51
769	0-7-0	B6	721	1.84	794.95
771	0-1-3-0	B7	2784	5.90	1019.92
768	0-6-0	B3	907.53	2.16	2096.63
777	0-2-4-0	B4	2050	4.66	1508.37
Subset	Kapasitas Kapal Maksimal (m3)	Load Factor	Kelayakan	Conventional Diesel Engine	Dual Fuel
640	1100	0.93	FEASIBLE	\$ 1,636,097.17	\$ 581,116.86
642	1100	0.72	FEASIBLE	\$ 1,554,419.16	\$ 609,147.72
644	1100	0.93	FEASIBLE	\$ 1,927,731.94	\$ 786,999.29
768	2500	0.84	FEASIBLE	\$ 1,771,700.71	\$ 750,939.38
777	2500	0.60	FEASIBLE	\$ 1,877,000.52	\$ 806,617.70
Total :				\$ 8,766,949.51	\$ 3,534,820.95

Untuk *cluster 2*, pilihan yang didapatkan melalui proses optimasi adalah kombinasi kapal dan rute yang memiliki biaya operasional per-tahun dan emisi gas rumah kaca yang paling rendah. Kombinasi yang paling optimal adalah dengan menggunakan tiga buah kapal jenis A dengan rute Ambon-Maumere-Ambon, Ambon-Timor-Ambon, dan Ambon-Rote-Waitabula-Ambon. Selain itu juga menggunakan dua

buah kapal B dengan rute Ambon-Kupang-Ambon, dan Ambon-Waingapu-Flores-Ambon. Biaya total tahunan yang dibutuhkan untuk skenario tersebut adalah sejumlah \$3,293,086.12.

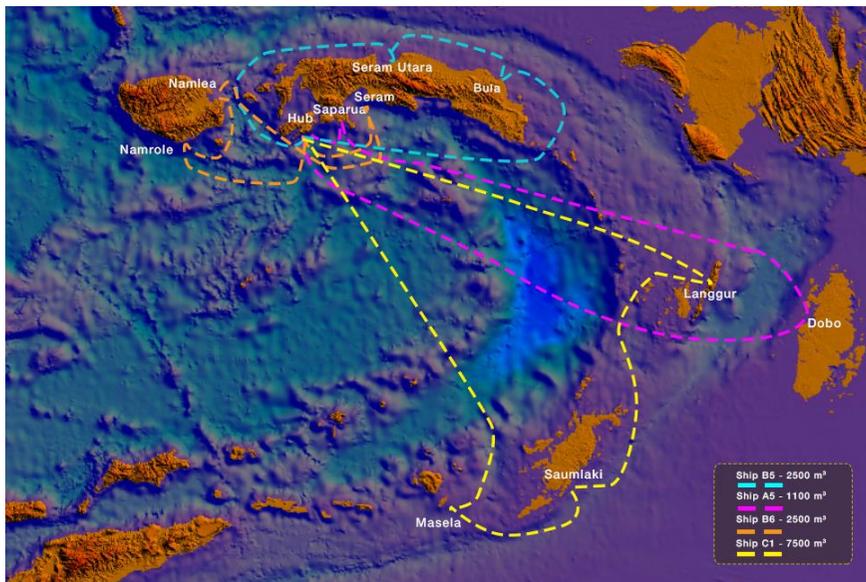


Gambar 4.18 Hasil Routing untuk Cluster 2

Tabel 4.24 Hasil Optimasi Cluster 3

Cluster 3					
Subset	Rute	Kapal	Jarak Pelayaran (km)	Durasi Pelayaran (hari)	Muatan Diangkut selama durasi (m3)
43	0-5-8-0	A5	1424.47	3.75	1011.55
1047	0-2-7-0	B8	856.47	2.63	1702.93
1156	0-6-3-9-0	B9	605	2.76	2085.42
2122	0-1-4-10-0	C1	1509.14	4.12	7116.91
Subset	Kapasitas Kapal Maksimal (m3)	Load Factor	Kelayakan	Conventional Diesel Engine	Dual Fuel
43	1100	0.92	FEASIBLE	\$ 1,260,679.68	\$ 906,469.20
1047	2500	0.68	FEASIBLE	\$ 1,648,356.10	\$ 1,214,131.22
1156	2500	0.83	FEASIBLE	\$ 1,672,859.61	\$ 1,452,888.24
2122	7500	0.95	FEASIBLE	\$ 4,117,319.90	\$ 2,940,504.68
				\$ 8,699,215.28	\$ 6,513,993.34

Untuk *cluster 3*, pilihan yang didapatkan melalui proses optimasi adalah kombinasi kapal dan rute yang memiliki biaya operasional per-tahun dan emisi gas rumah kaca yang paling rendah. Kombinasi yang paling optimal adalah dengan menggunakan satu buah kapal jenis A dengan rute Ambon-Dobo-Saparua-Ambon. Juga menggunakan dua buah kapal jenis B yang melayani rute Ambon-Bula-Seram Utara-Ambon dan Ambon-Seram-Namlea-Namrole. Selain itu juga menggunakan satu buah kapal jenis C yang melayani Ambon-Langgur-Saumlaki-Masela-Ambon. Biaya minimum yang dibutuhkan untuk skenario tersebut adalah sebesar \$6,513,993.34.



Gambar 4.19 Hasil Routing untuk Cluster 3

4.13 Pembahasan

Dari optimasi yang dilakukan, didapatkan bahwa mayoritas *subset* terpilih adalah yang menggunakan *mini LNG Carrier* dengan kapasitas kecil melayani satu atau dua terminal masing-masing dalam jumlah unit kapal yang banyak walaupun dengan demikian biaya bahan bakar akan menjadi lebih banyak.

Dari hasil perhitungan pada tugas akhir ini, dapat diketahui bahwa hasil tersebut disebabkan oleh tiga faktor yang saling memengaruhi.

Faktor pertama adalah durasi pelayaran. *Subset* yang jumlah terminal yang dilayaninya lebih sedikit memerlukan durasi pelayaran yang lebih singkat. Durasi yang singkat tersebut menyebabkan investasi darat yang harus disiapkan untuk menampung LNG dalam interval pelayaran menjadi rendah. Faktor kedua, kapal yang berukuran lebih kecil menyebabkan investasi untuk pembangunan *jetty* atau dermaga bongkar muat yang lebih rendah. Faktor ketiga adalah biaya operasional terminal seperti Tandu, Pandu, dan Tambat menjadi lebih rendah akibat *Gross Tonnage* kapal yang lebih kecil.

Pemasukan faktor emisi kedalam biaya pada tugas akhir ini tidak terlalu mempengaruhi signifikansi dari hasil. Besarnya *damage cost* dari gas rumah kaca rupanya tidak terlalu berpengaruh terhadap hasil jika skenario distribusi yang diperhitungkan juga mengikutsertakan biaya investasi yang relatif besar seperti contohnya investasi darat untuk pembangunan terminal penerima LNG.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Dengan implementasi algoritma *Bin Packing Problem* untuk menyelesaikan *Vehicle Routing Problem (VRP)* maka didapatkan kombinasi-kombinasi rute untuk Cluster pertama sebanyak 3 set rute yaitu Ambon-Bombana-Baubau-Ambon, Ambon-Kendari-Ambon, dan Ambon-Kolaka Utara-Selayar-Ambon. Biaya operasional tahunan minimum yang dibutuhkan untuk cluster satu adalah sebesar \$3,249,297.96. Setelah itu, susunan rute pada Cluster kedua terdiri dari 5 set rute yaitu Ambon-Maumere-Ambon, Ambon-Timor-Ambon, Ambon-Rote-Waitabula-Ambon, Ambon-Kupang-Ambon, dan Ambon-Waingapu-Flores-Ambon. Biaya tahunan yang dibutuhkan untuk Cluster kedua adalah sebesar \$3,534,820.95. Untuk cluster ketiga didapatkan sebanyak 4 set rute yaitu Ambon-Dobo-Saparua-Ambon, Ambon-Bula-Seram Utara-Ambon, Ambon-Seram-Namlea-Namrole, dan Ambon-Langgur-Saumlaki-Masela-Ambon. Biaya tahunan yang dibutuhkan untuk cluster tiga adalah sebesar \$6,513,993.34.
2. Pada cluster pertama, digunakan tiga unit kapal tipe B. Pada cluster kedua, digunakan lima unit kapal tipe B. Pada cluster ketiga, digunakan satu unit kapal tipe A, dua unit kapal tipe B, dan satu unit kapal tipe C. Hasil yang didapat membuktikan bahwa kapal dengan ukuran kecil selalu diprioritaskan dalam scenario distribusi LNG untuk pembangkit-pembangkit yang berukuran kecil.
3. Dengan menggunakan bahan bakar gas sebagai bahan bakar mesin penggerak kapal, potensi pengurangan biaya operasional yang telah mencakup biaya emisi dapat dihitung (Lihat gambar 49). Untuk cluster pertama, potensi pengurangan biaya operasionalnya adalah sebesar \$2,926,136.03. Untuk cluster kedua, potensi pengurangan biaya operasionalnya adalah sebesar \$5,232,128.56. Dan untuk cluster ketiga, potensi pengurangan biaya operasionalnya adalah sebesar \$2,185,221.94.

5.1 Saran

1. Dalam penentuan rute, akan lebih baik apabila dapat mengikut sertakan *multiple-routes* selain *single routes* untuk menambah alternatif pilihan yang mungkin lebih optimal.
2. Dalam perbandingan penggunaan bahan bakar dapat melakukan perbandingan antara berbagai jenis bahan bakar dengan jenis yang sama namun tipe berbeda. Seperti misalnya antara berbagai LNG komersial dengan spesifikasi dan harga yang berbeda atau antara bahan bakar minyak dengan karakteristik dan harga yang berbeda.
3. Dalam perhitungan biaya investasi darat akan lebih baik apabila disesuaikan dengan kondisi geografis masing-masing terminal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Alcamo, J., Krol, M. dan Leemans, R. (1995) 'Stabilizing greenhouse gases: Global dan regional consequences', *Studies in Environmental Science*, 65(PART A), pp. 135–149. doi: 10.1016/S0166-1116(06)80201-3.
- Artana, K. B. dan Soegiono (2006) *Transportasi LNG Indonesia*. Surabaya: Airlangga University Press.
- BalASF, E. (1976) 'Set partitioning: a survey*', 18(4), pp. 710–760.
- Braekers, K., Ramaekers, K. dan Van Nieuwenhuysse, I. (2016) 'The vehicle routing problem: State of the art classification and review', *Computers and Industrial Engineering*. Elsevier Ltd, 99, pp. 300–313. doi: 10.1016/j.cie.2015.12.007.
- British Petroleum (2019) *BP Statistical Review of World Energy*. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- Bureau of Transport Economic (1982) 'An estimation of Operating Costs for Bulk, Ro-ro and Container Ships'.
- climatecentral.org (2019) *Global Warming Illustration*. Available at: climatecentral.org.
- Das, A., Mathieu, C. dan Mozes, S. (2011) 'The train delivery problem - Vehicle routing meets bin packing', *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6534 LNCS, pp. 94–105. doi: 10.1007/978-3-642-18318-8_9.
- Dasira, A. (2004) *Optimasi Penentuan Armada Dan Kecepatan Operasi Kapal Kontainer Pada Perusahaan Pelayaran Liner*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi (2018) *Laporan Tahunan Capaian Pembangunan*. Jakarta.
- DNV-GL (2020) *Current price development oil and gas*. Available at: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html>.
- Fagerholt, K. (1999) 'Optimal fleet design in a ship routing problem', *International Transactions in Operational Research*, 6(5), pp. 453–464. doi: 10.1111/j.1475-3995.1999.tb00167.x.
- Garey, M. R. dan Johnson, D. S. (1978) "'Strong" NP-Completeness Results: Motivation, Examples, and Implications', *Journal of the ACM (JACM)*, 25(3), pp. 499–508. doi: 10.1145/322077.322090.
- IHRDC (2019) *Natural Gas: LNG volume is equal to 625:1*. Available at: https://www.ihrdc.com/els/po-demo/module15/mod_015_02.htm.
- Lin, C. *et al.* (2014) 'Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future

trends', *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), pp. 1118–1138. doi: 10.1016/j.eswa.2013.07.107.

Marine Environment Protection Committee (2009) *Guidelines for Voluntary Use of EEOI*.

Melrose PLC (2017) 'Annual Report 2017', *NTT Docomo*, 21(5), p. 430. doi: 10.1080/10417940509373326.

Nocedal, J. dan Wright, S. J. (1999) *Numerical optimization, Advances in Industrial Control*. doi: 10.1007/978-1-4471-2224-1_2.

Perusahaan Listrik Negara (2018) *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2018-2027*.

Purwanto, W. W. *et al.* (2016) 'Status and outlook of natural gas industry development in Indonesia', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Elsevier B.V, 29, pp. 55–65. doi: 10.1016/j.jngse.2015.12.053.

Putra, Made Arya Satya Dharma Artana, K. B. dan Handani, D. Wi. (2016) 'Desain Rantai Pasok Gas Alam Cair (LNG) untuk Kebutuhan Pembangkit Listrik di Indonesia Bagian Timur', *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). doi: 10.12962/j23373539.v5i2.19120.

Safety4Sea (2020) *LNG Carrier Image*. Available at: <https://safety4sea.com/mol-tokyo-lng-name-new-lng-carrier/>.

Setyorini, P. D. (2018) 'Kombinasi AHP-PROMETHEE untuk Pemilihan Terminal LNG dan Optimasi Distribusi LNG dengan Metode Set Partitioning Problem A Combined AHP-PROMETHEE for LNG Terminal Selection and Optimization of LNG Distribution using Set Partitioning Problem'.

Shuo, M. (1999) *Maritime Economics*. 1st edn. Fiskehamngatan: World Maritime University.

Siringoringo, J. T. (2014) *Bin Packing Problem Formulation For LNG Disribution Optimization for Power Plants in Riau Islands*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

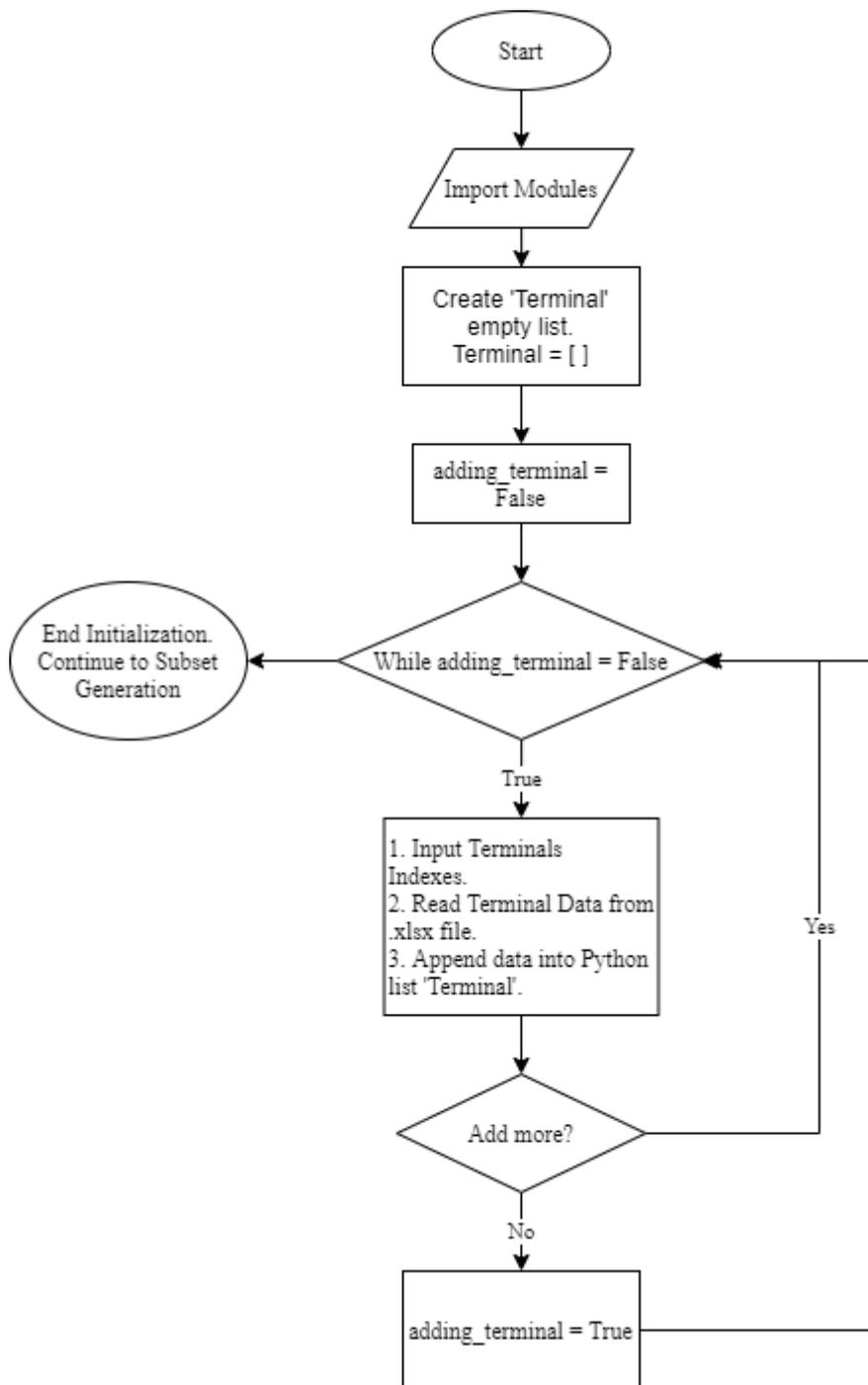
Tol, R. S. J. (2005) 'The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: An assessment of the uncertainties', *Energy Policy*, 33(16), pp. 2064–2074. doi: 10.1016/j.enpol.2004.04.002.

Ventura, M. (2005) 'Cost Estimate Course Lecture'.

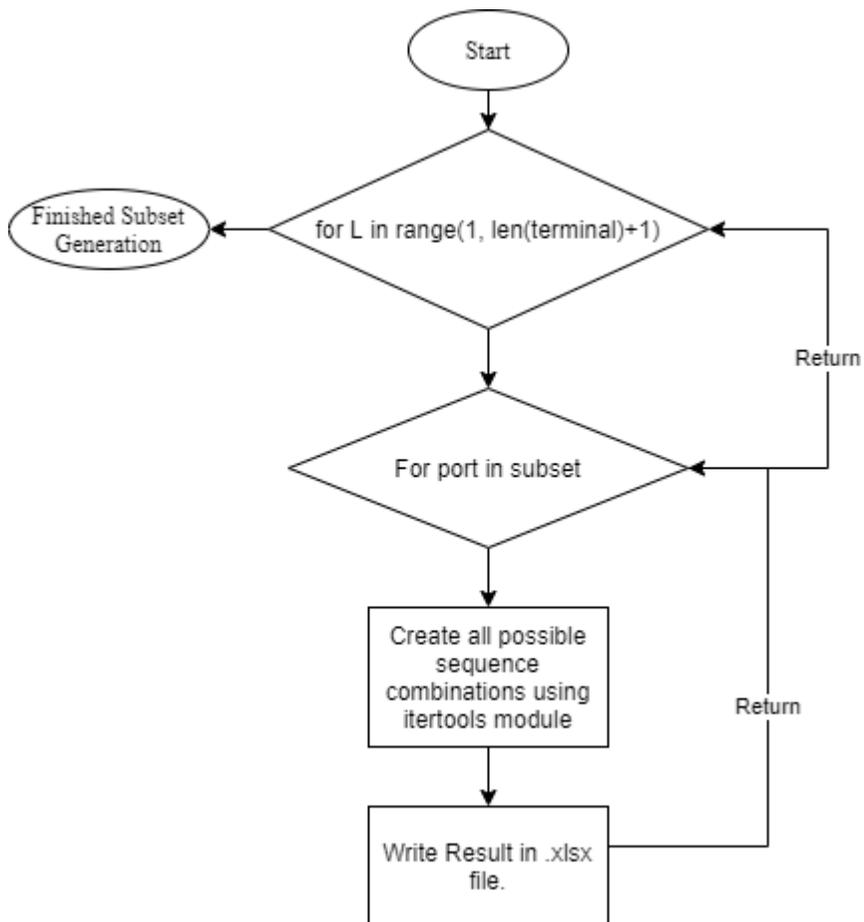
White, J. D. *et al.* (1998) 'Assessing Simulated Ecosystem Processes for Climate Variability Research at Glacier National Park, USA', *Ecological Applications*, 8(3), p. 805. doi: 10.2307/2641268.

LAMPIRAN

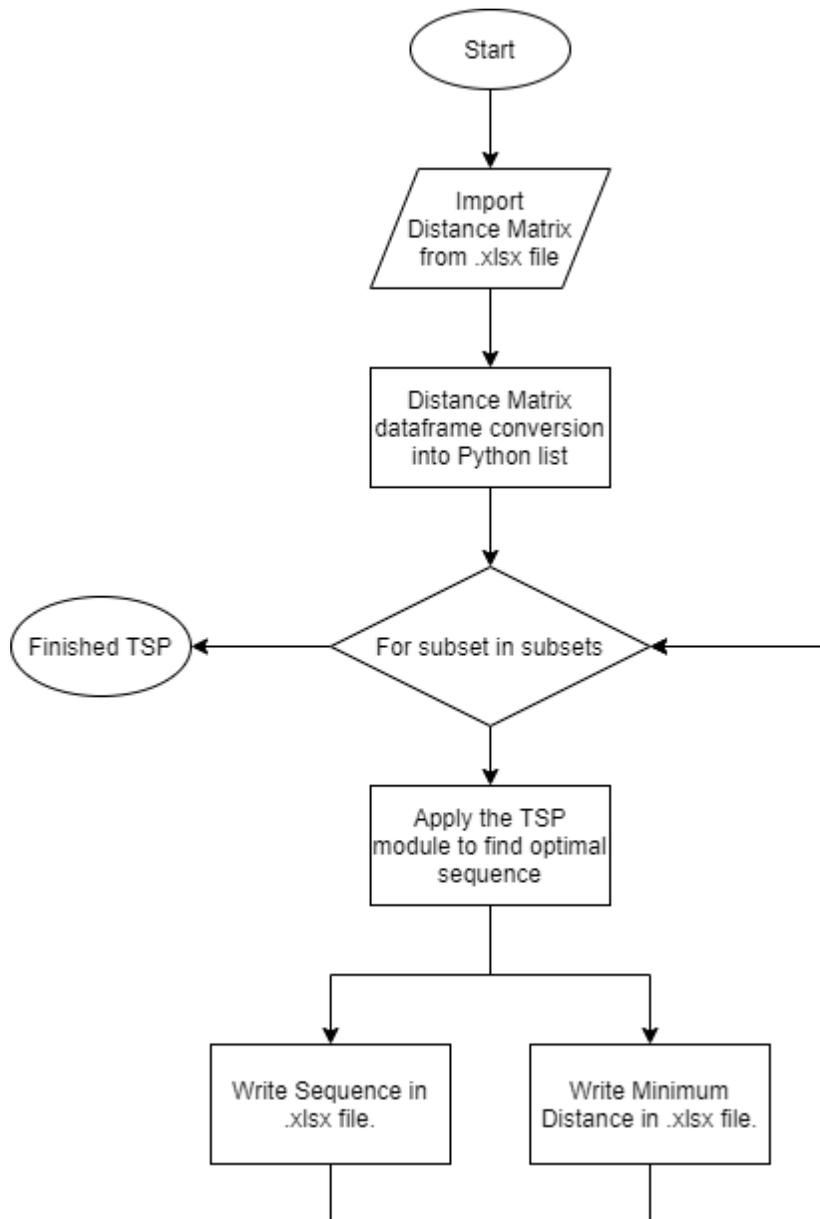
A. Diagram alur inisialisasi



B. Diagram alur pembentukan rute awal



C. Diagram alur optimasi rute(subset) dengan modul TSP



D. Program

```
import time
import itertools
import xlswriter as xl
import functools
import operator
import tsp
import pandas as pd

terminal = []
final_optimal_route = []
possible_route = []
distance_travelled = []

workbook = xl.Workbook('C:/Users/ASUS/Documents/Rute.xlsx')
worksheet = workbook.add_worksheet('PossibleRoutes')

adding = False

print('POSSIBLE ROUTES GENERATOR')
print('-----')

#Input Structure

while adding == False:
    add = input('Masukkan kode angka terminal penerima. Kosongkan dan
tekan enter sudah selesai :')
    terminal.append(add)
    if add == '':
        terminal.remove('')
        adding = True
    else:
        continue

row4 = 1
progress = 0

#Main Structure

for L in range(1, len(terminal)+1):

    #Possible Route Iteration

    for subset in itertools.combinations(terminal, L):
```

```

print(progress, 'of', '1023')
progress += 1

base_index = 2

print(subset)

for port_index in subset:
    print(port_index)
    base_index = 2+int(port_index)
    worksheet.write(row4, base_index, '1')

row4 += 1

#Port Indexing
column4 = 2 + int()

#TSP Preparation
generate_subset = 0
rute = [0,]

for port in subset:
    rute.append(int(subset[generate_subset]))
    generate_subset+=1

#Importing Distance Matrix

file = pd.ExcelFile('/Users/ASUS/Desktop/latian tsp.xlsx')
matriks = file.parse('Sheet1')
listx = []
finalmat = []

for iterasi in rute:
    listx=[]
    x = int(iterasi)
    for iterasi2 in rute:
        y = int(iterasi2)
        listx.append(matriks.loc[x,y])
    finalmat.append(listx)

#TSP Execution

r = range(len(finalmat))

dist = {(i, j): finalmat[i][j] for i in r for j in r}

tsp_result = tsp.tsp(r, dist)[1]
total_distance = tsp.tsp(r, dist)[0]

```

```

optimal_route = []
optimal_route_index = 0

for tsp_result_elem in tsp_result:
    optimal_route.append(rute[tsp_result_elem])
    optimal_route_index += 1

distance_travelled.append(str(total_distance))

#Conversion of Routes after TSP
ii = 0
str1 = []

for i in optimal_route:
    str1.append(str(optimal_route[ii]))
    ii += 1

def convertList(lst):
    string = '-'.join(lst)
    return string
list = str1
string = convertList(list)
final_optimal_route.append(string+'-0')

#Conversion of Routes Before TSP

def convertTuple(tup):
    string = '-'.join(tup)
    return string
tuple = subset
string = convertTuple(tuple)
possible_route.append('0-'+string+'-0')

#Write Result Befor TSP

row = 1
row2 = 1
row3 = 1
column = 0
column2 = 1
column3 = 2

for subset_distance in (distance_travelled):
    worksheet.write(row3, column3, subset_distance)
    row3 += 1

for routes in (possible_route):
    worksheet.write(row, column, routes)
    row += 1

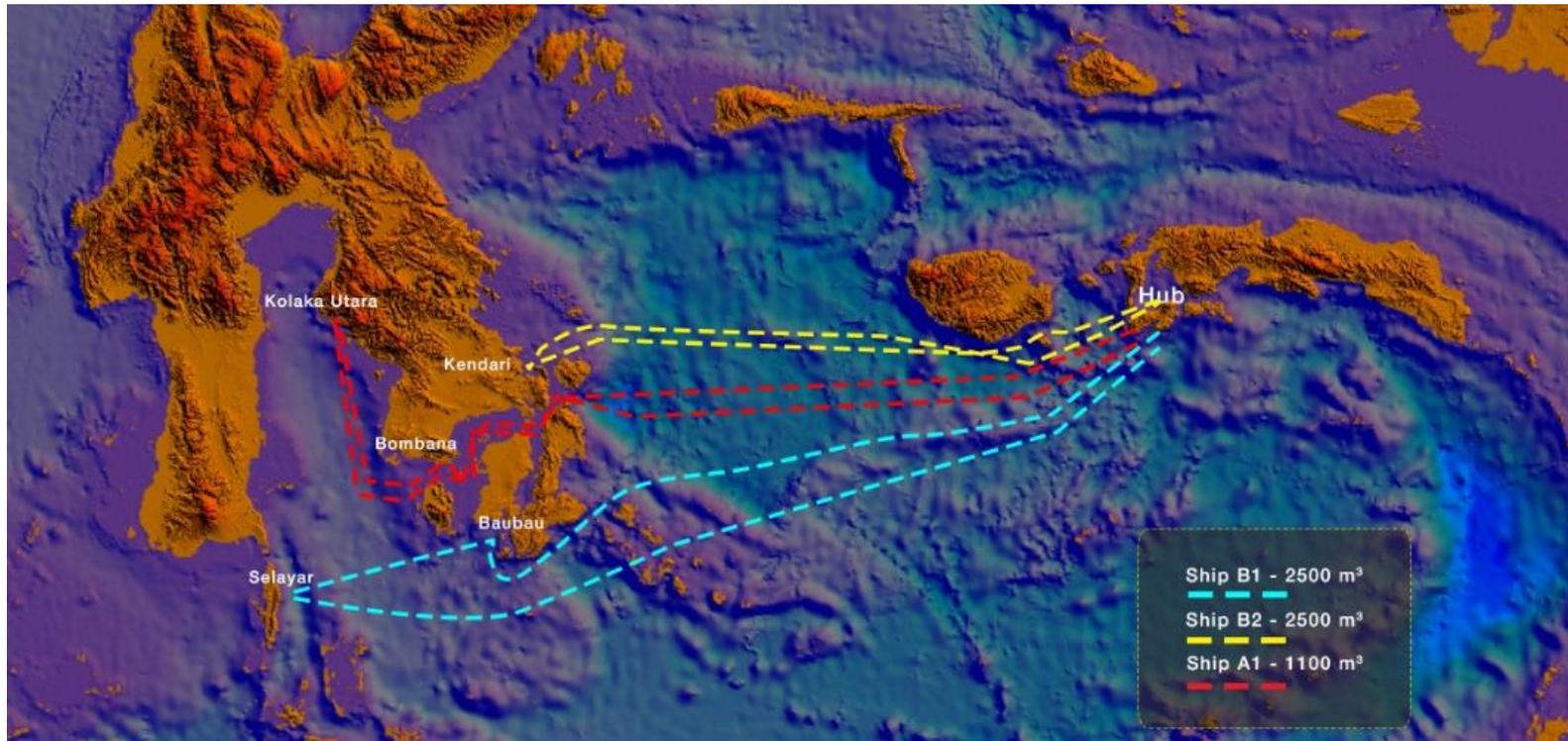
```

```
for global_opt in (final_optimal_route):
    worksheet.write(row2, column2, global_opt)
    row2 += 1

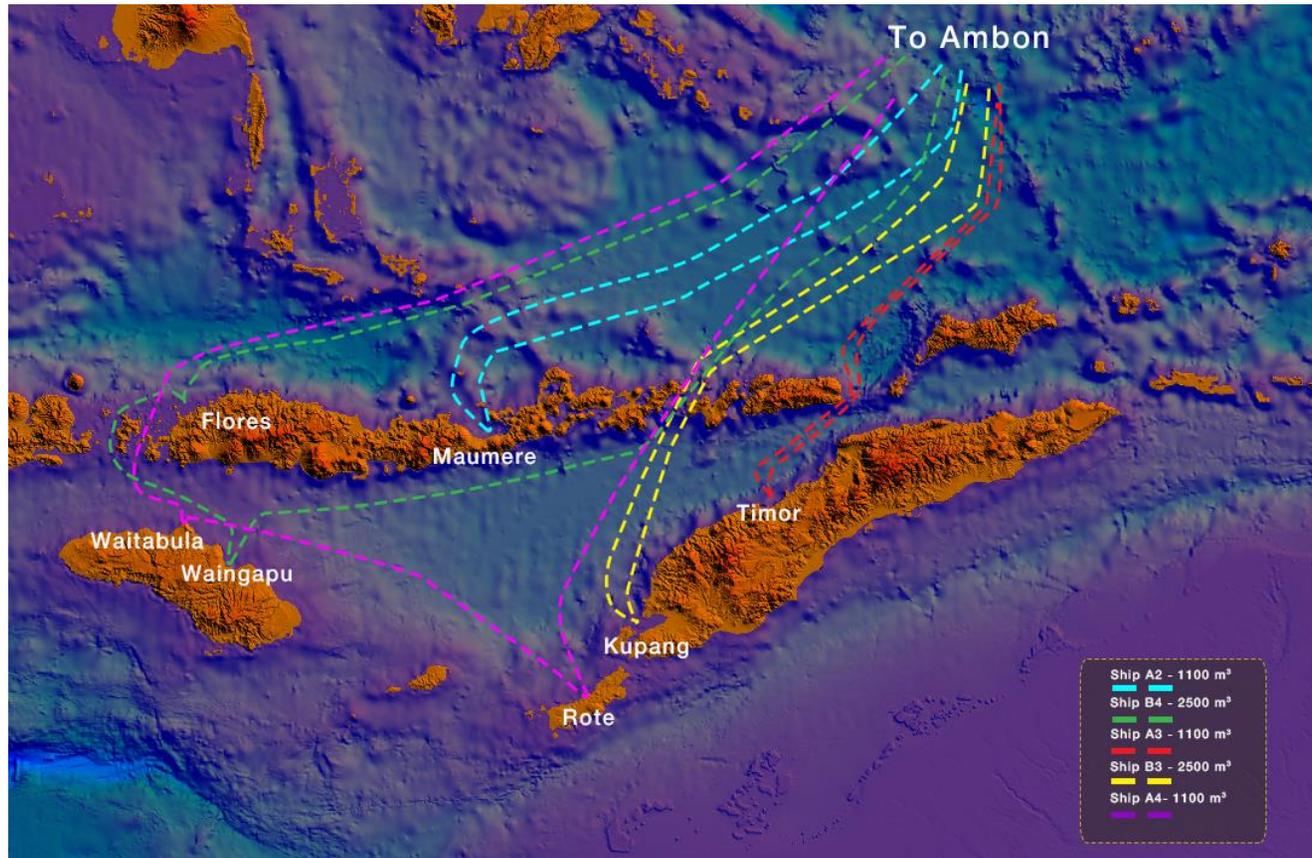
workbook.close()

print('BUKA FILE "rute.xlsx di my document" untuk meihat hasilnya')
print('-----THANK YOU-----')
```

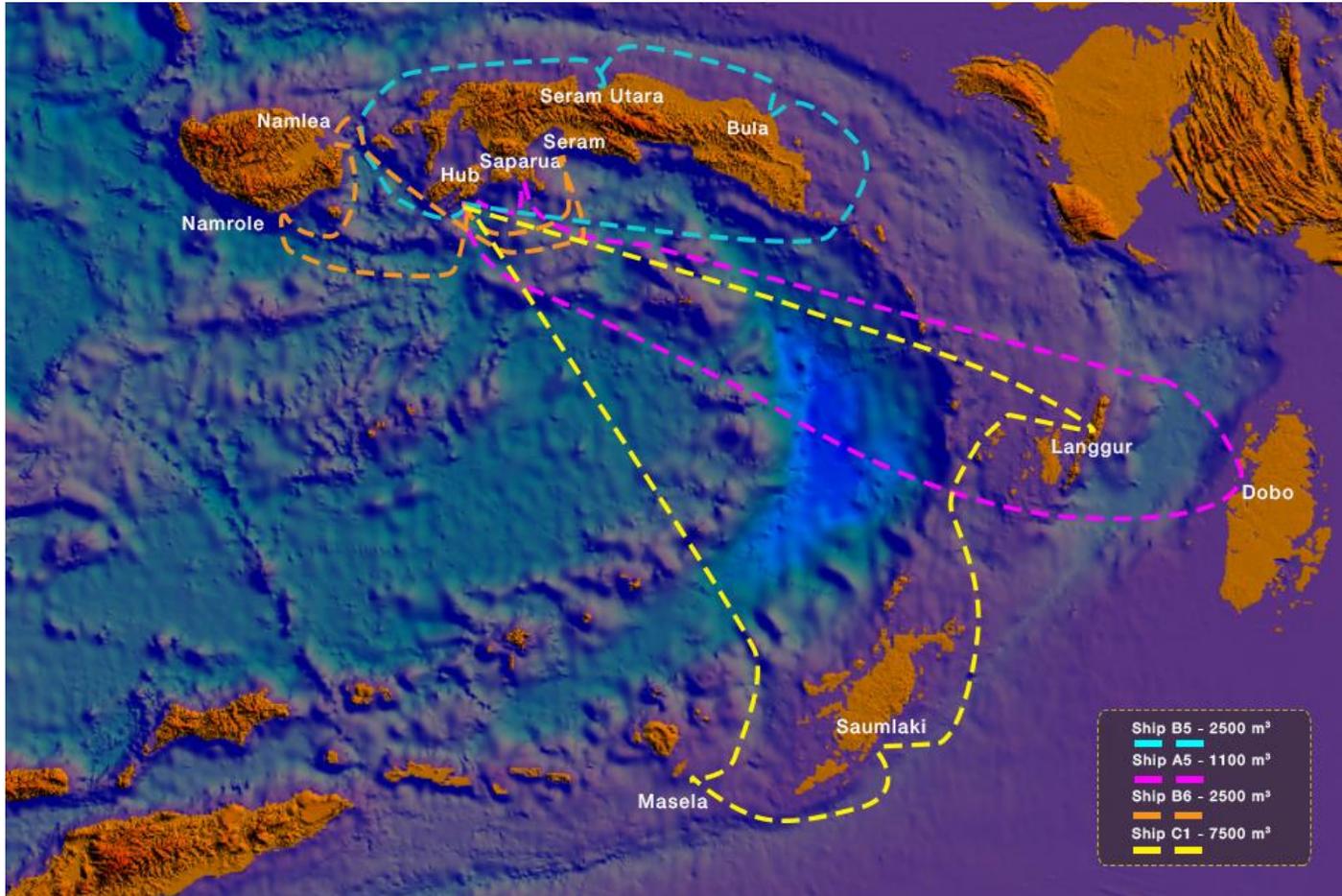
E. Visualisasi Hasil Cluster 1



F. Visualisasi Hasil Cluster 2



D. Visualisasi Hasil Cluster 3



E. Data Operasional DF Diesel Engine mode gas

DF M/E IN GAS OPERATION			
LNG LHV	kJ/g	45	
	MMBTU/kg	0.042651765	
SFOC (85% Load)	g/kWh	4.2	
SFOC (30% Load)	g/kWh	6.7	
SFGC (85% Load)	kJ/kWh	8219	17935.85
	g/kWh	182.64	807113.25
SFGC (30% Load)	kJ/kWh	8862	0.80711325
	g/kWh	196.93	
HSD Price	\$/ton	513	
LNG Price	\$/MMBTU	17	
	\$/kJ	0.016113744	
	\$/Ton	0.725080005	

F. Data Tarif Pelabuhan

Komponen Biaya		Satuan Tarif	Tarif
Jasa Tambat			
	a. Dermaga	per GT	IDR 96.83
	b. Breasting Dolphin	per GT	IDR 48.42
	c. Pinggiran	per GT	IDR 30.58
	Total	per GT	IDR 175.83
Jasa Pandu			
	a. Tarif Tetap	per Kapal per Gerakan	IDR 2,828,862.00
	b. Tarif Variabel	per GT per Gerakan	IDR 122.25
Jasa Tunda			
1. Kapal s.d. 3500 GT			
	a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 825,000.00
	b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00
1. Kapal s.d. 3501 s.d. 8000 GT			
	a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 1,430,000.00
	b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00
1. Kapal s.d. 8001 s.d. 14000 GT			
	a. Tarif Tetap	per Kapal per Jam	IDR 2,530,000.00
	b. Tarif Variabel	per GT per Kapal Per Jam	IDR 30.00

G. Matrix Jarak

<i>DISTANCE MATRIX (km)</i>											
SULAWESI TENGGARA											
	0	1	2	3	4	5					
0	0	665	737	742	895	937					
1	665	0	188	215	493	438					
2	737	188	0	210	420	435					
3	742	215	210	0	268	283					
4	895	493	420	268	0	284					
5	937	438	435	283	284	0					
MALUKU CLUSTER											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	550	406	159	688	710	73	300	48	190	537
1	550	0	382	681	235	188	500	522	505	710	430
2	406	382	0	397	557	512	360	150	357	568	593

3	159	681	397	0	638	858	220	263	203	122	625
4	688	235	557	638	0	397	700	789	690	845	188
5	710	188	512	858	397	0	664	667	666	871	551
6	73	500	360	220	700	664	0	392	51	257	545
7	300	522	150	263	789	667	392	0	334	343	751
8	48	505	357	203	690	666	51	334	0	232	514
9	190	710	568	122	845	871	257	343	232	0	594
10	537	430	593	625	188	551	545	751	514	594	0

EASTERN NUSA TENGGARA

	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0	1079	1280	1210	1079	1027	907	721	
1	1079	0	390	495	535	434	20	302	
2	1280	390	0	99	192	460	390	497	
3	1210	495	99	0	140	437	471	595	
4	1079	535	192	140	0	276	567	590	
5	1027	434	460	437	276	0	388	310	
6	907.53	20	390	471	567	388	0	228	
7	721	302	497	595	590	310	228	0	

H. Data Kapal

Ship	Cap.	Rent	Engine Power @MCR (kW)	FOC(GOC) g/kWh(kJ/kWh)	GOC @low load	Fuel Price (USD/Ton)	GRT	Service Speed (knot)
SHIP A HSD	1100	\$ 7800.0.00	1000	180	4.2	630	1687	12.2
SHIP A DUAL FUEL	1100	\$ 7800.0.00	1000	8219	8862	186		12.2
SHIP B HSD	2500	\$ 10426.0.00	1676	180	4.2	630	2936	13
SHIP B DUAL FUEL	2500	\$ 10426.0.00	1676	8219	8862	186		13
SHIP C HSD	7500	\$ 19806.0.00	4090	180	4.2	630	7907	14
SHIP C DUAL FUEL	7500	\$ 19806.0.00	4090	8219	8862	186		14
SHIP D HSD	10000	\$ 24496.0.00	5297	180	4.2	630	10105	14
SHIP D DUAL FUEL	10000	\$ 24496.0.00	5297	8219	8862	186		14
SHIP E HSD	15600	\$ 35000.0.00	8000	180	4.2	630	13501	15
SHIP E DUAL FUEL	15600	\$ 35000.0.00	8000	8219	8862	186		15

H. Tabel Kebutuhan LNG Berdasarkan Kapasitas

<i>LNG DEMAND POINTS</i>				
<i>EASTERN NUSA TENGGARA CLUSTER</i>			KEBUTUHAN LNG PER HARI	
Termina 1	Pembangkit	Kapasitas (MW)	r	m3 LNG/day
1	PLTMG Rote	6	7.2	43.2
2	PLTMG Waingapu	10	7.2	72
3	PLTMG Waitabula	10	7.2	72
4	MPP Flores	20	7.2	144
5	PLTMG Maumere	40	7.2	288
6	PLTMG Kupang 2	50	7.2	360
	PLTMG Kupang Peaker	40	7.2	288
7	PLTMG Timor 1	40	7.2	288
TOTAL		216	TOTAL	1555.2
<i>SULBAGTRA CLUSTER</i>				
Termina 1	Pembangkit	Kapasitas (MW)		
1	PLTMG Kendari	50	7.2	360
2	MPP Bombana	10	7.2	72
3	MPP Bau-bau	30	7.2	216
4	MPP Kolaka Utara	5	7.2	36
5	PLTMG Selayar 1&2	20	7.2	144
TOTAL		115	TOTAL	828
<i>MALUKU CLUSTER</i>				
Termina 1	Pembangkit	Kapasitas (MW)		
hub	PLTMG Ambon Peaker	120	7.2	864
	PLTMG Ambon 2			
	PLTMG Ambon			
1	PLTMG Langgur	40	7.2	288
	PLTMG Langgur 2			
	PLTMG Langgur 3			
2	PLTMG Bula	10	7.2	72

3	PLTMG Namlea	20	7.2	144
	PLTMG Namlea 2			
4	PLTMG Saumlaki	20	7.2	144
	PLTMG Saumlaki 2			
5	PLTMG Dobo	20	7.2	144
	PLTMG Dobo 2			
6	PLTMG Seram	40	7.2	288
	PLTMG Seram 2			
7	PLTMG Seram Utara	20	7.2	144
8	PLTMG Saparua	5	7.2	36
9	PLTMG Namrole	10	7.2	72
10	PLTMG Masela	20	7.2	144
TOTAL		325	TOTAL	2340
<i>MALUKU CLUSTER</i>				
Termina 1	Pembangkit	Kapasitas (MW)		
1	PLTMG Sofifi	120	7.2	864
	PLTMG Ternate			
	PLTMG Ternate 2			
2	PLTMG Tobelo	40	7.2	288
	PLTMG Bacan			
	PLTMG Sanana			
3	PLTMG Namlea	20	7.2	144
	PLTMG Namlea 2			
4	PLTMG Saumlaki	20	7.2	144
	PLTMG Saumlaki 2			
5	PLTMG Dobo	20	7.2	144
	PLTMG Dobo 2			
6	PLTMG Seram	40	7.2	288
	PLTMG Seram 2			
7	PLTMG Seram Utara	20	7.2	144
8	PLTMG Saparua	5	7.2	36
9	PLTMG Namrole	10	7.2	72
10	PLTMG Masela	20	7.2	144
TOTAL		315	TOTAL	2268

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Biografi Penulis



Penulis lahir di Bandung, Jawa Barat pada tanggal 27 Maret tahun 1998 dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menjalani pendidikan formal di TK Bunga Bakung Bogor, SD Xaverius 1 Palembang, SD Marsudirini Jakarta, SMP Marsudirini Bekasi, dan SMA Marsudirini Bekasi. Pada tahun 2016 penulis diterima sebagai mahasiswa Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK, ITS, Surabaya. Selama masa perkuliahan, penulis mengambil bidang *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety (RAMS)*. Selama menjalani pendidikan S1 penulis aktif dalam organisasi NACE *Student Chapter* ITS. Penulis juga aktif mengikuti berbagai kepanitiaan seperti Marine Icon, Natal dan Paskah PMK, dan MASTIC. Penulis juga memiliki pengalaman mengikuti konferensi nasional maupun internasional seperti Schematics, MASTIC, IMAREST International Conference, MOTIP, dan 6th ISSC. Selain aktivitas akademis dan organisasi, penulis juga aktif dalam bidang olahraga bola basket baik dalam tingkat jurusan, fakultas, maupun institut. Selain itu, penulis juga memiliki hobi mendalami bidang pemrograman dan analisa data. Penulis menyelesaikan studi S1 selama 8 semester.

Joshua Jonathan Alfonso Siahaan
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK, ITS, Surabaya
Joshuasiahaan27@gmail.com