

Analisa Kapal Berbahan Bakar LNG sebagai Marine Fuel dalam Mengurangi Emisi Gas Buang Terhadap Lalu Lintas Kapal di Pelabuhan Bitung

Hendra Palebangan*¹ dan Yanuar²

Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia^{1,2}

Jl. Kampus UI, Beji, Depok 16424, Indonesia

E-mail: padangiring@gmail.com

Diterima : 23 Januari 2019, disetujui: 27 Juni 2019, diterbitkan online: 28 Juni 2019

Abstrak

Pemerintah mempunyai program konversi bahan bakar kapal dari minyak ke gas alam yang bertujuan untuk memperbaiki efisiensi layanan transportasi laut. Perluasan penggunaan gas alam di sektor maritim akan mengurangi ketergantungan Bahan Bakar Minyak (BBM) yang telah digunakan oleh kapal-kapal di Indonesia. Di sisi lain, gas alam bisa digunakan di seluruh sektor, seperti industri, pembangkit tenaga listrik, hingga rumah tangga. Kasus ini diharapkan sejalan dengan tingkat emisi dari sektor ini untuk bisa ditekan menjadi ramah lingkungan daripada menggunakan bahan bakar fosil. Penelitian ini dibatasi pada kapal laut dengan jumlah kapal yang diasumsikan sebanyak 1.100 sampel dari berbagai jenis ukuran kapal berbeda yang menggunakan bahan bakar BBM (MGO). Pengasumsian setiap kapal akan menghabiskan satu hari (24 jam) di Pelabuhan Bitung untuk menunggu berlabuh dan tiga hari (72 jam) untuk melakukan bongkar muat. Sehingga asumsi total waktu aktivitas yaitu ± 96 jam untuk setiap kapal. Waktu aktivitas menunjukkan jumlah jam kerja mesin bantu (AE) dimana selama kapal berlabuh telah mengeluarkan 9.128,4 ton emisi (CO, NO_x, SO_x dan PM) ke atmosfer yang menyebabkan polusi udara. Analisis tersebut juga menunjukkan bahwa emisi kapal-kapal yang jangkar dan sandar di pelabuhan telah menempatkan biaya faktor eksternal sekitar 7.080.815 USD sehingga memiliki dampak ekonomi terhadap Pelabuhan Bitung, masyarakat, dan lingkungan.

Kata kunci: Bunkering, pelabuhan, LNG, transportasi laut, kawasan timur Indonesia.

Abstract

Analysis of LNG-Fueled Vessels as Marine Fuel in Reducing Exhaust Emissions Towards Ship Traffic in Bitung Port: The government has a program to convert ship fuel from oil to natural gas aiming to improve the efficiency of sea transportation services. The expansion of the use of natural gas in the maritime sector will reduce the dependence of fuel oil that has been used by ships in Indonesia. On the other hand, natural gas can be used for all sectors: industries, power plants, households, etc. This case is expected to be in line with the level of emissions from this sector so that it can be suppressed to be environmentally friendly rather than using fossil fuels. The limitation of the study is set for marine vessels with the assumption of 1,100 samples of different types of ship sizes using fuel oil (MGO). It is assumed that each ship will spend one day (24 hours) in Bitung port for waiting to dock and three days (72 hours) to do loading and unloading. As a result, the assumption of total activity time is ± 96 hours for each ship. The activities show the number of working hours of Auxiliary Engine (AE). During the anchored, ship has taken out 9,128.4 tons of emissions (CO, NO_x, SO_x and PM) to the atmosphere which causes air pollution. The analysis also shows that the emissions of ships docking and anchoring in ports set external factor costs of around 7,080,815 USD that has an economic impact on Bitung Port, community, and environment.

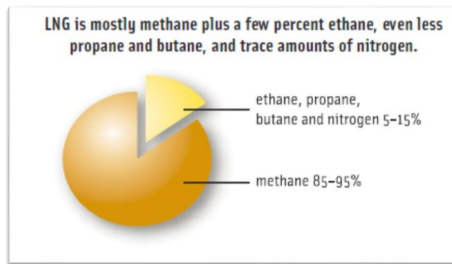
Keywords: Bunkering, ports, LNG, sea transportation, eastern Indonesia.

1. Pendahuluan

LNG (*Liquified Natural Gas*) adalah gas alam yang dicairkan dengan cara didinginkan sampai mencapai suhu -160°C dengan tekanan atmosfer. Proses semacam ini disebut dengan pencairan gas bumi (Natural Gas Liquifaction). Gas alam cair memiliki volume 1/600 kali dari keadaan sebelum dicairkan. Komposisi LNG pada umumnya terdiri dari 85-95% mol metana ditambah etana dan sebagian kecil propana, butana, dan nitrogen sekitar 5-15%, dapat dilihat gambar 1. Komposisi LNG yang

sebenarnya bergantung pada sumber gas dan teknologi pemrosesannya.

LNG memiliki kandungan energi per volume lebih besar dibandingkan dengan jenis bahan bakar lain yang bersumber dari gas hidrokarbon. Pada Tabel 1 diperlihatkan densitas energi persatuan volume dari beberapa bentuk energi. LNG merupakan bentuk energi yang mudah untuk ditransportasikan. LNG dapat dihasilkan dengan berbagai cara diantaranya yaitu: Ekstraksi menggunakan LNG *cold box*; Penambahan unit



Gambar 1. Komposisi LNG [1]

purifikasi dan *liquefaction* pada sistem *cryogenic NGL plant*; Penambahan unit *power liquefier*; Stasiun penurun tekanan pada jalur pipa transmisi gas; Menggunakan nitrogen cair sebagai unit pendinginan.

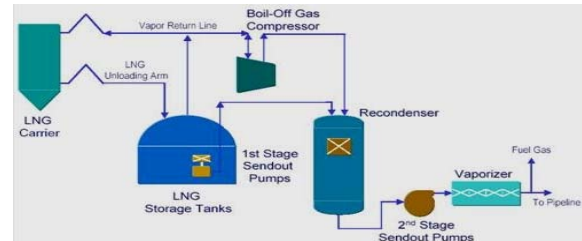
Fasilitas *receiving* terminal LNG terdiri dari beberapa unit instalasi. Instalasi terminal LNG dapat dilihat gambar 2. Unit-unit tersebut adalah sebagai berikut: LNG *carrier berthing* dan fasilitas *unloading*; Tangki penyimpanan LNG; Sistem regasifikasi atau penguapan; Fasilitas untuk mengatasi *gas boil off*; *metering* dan stasiun pengaturan tekanan; Perpipaan pengiriman gas. Distribusi LNG dari terminal dapat dilakukan melalui fasilitas-fasilitas jalur pipa yang terpasang disekitar lokasi terminal penerimaan LNG di wilayah tersebut atau melalui truk-truk tangki dan melalui *tanker-tanker* untuk daerah atau wilayah yang berdekatan dengan pantai atau laut. *Lay-out* terminal LNG bervariasi, karena dikondisikan antara wilayah padat konsumen dengan faktor keadaan alam.

LNG telah terbukti menjadi bahan bakar laut yang layak secara teknis dan ekonomis terhadap kapal-kapal komersial. Di Indonesia telah teridentifikasi kedepannya konsumen pengguna LNG berada di pembangkit tenaga listrik dan bahan bakar *marine*. Banyaknya sumur-sumur gas yang tersedia di daerah-daerah terpencil memberikan peluang potensial pasokan energi kedepannya untuk dieksplorasi sebagai pengganti bahan bakar minyak. Melalui peluang ini akan mendorong meningkatnya minat pengguna sebagai bahan bakar di dalam industri perkapalan dan khususnya kapal laut. Pelabuhan Bitung sebagai pelabuhan *Hub* Internasional letaknya yang strategis nantinya menjadi pelabuhan *hub* kapal-kapal berbendera asing dan berbendera Indonesia yang membawa keluar masuk barang-barang ekspor dan impor selaras dengan pembangunan infrastruktur

Tabel 1. Kandungan Kalor dari Beberapa Jenis Bahan Bakar

Bahan Bakar	MJ/lit	MJ/kg
Metana	0.035	50.0
CNG	8.7	50.0
LNG	21.6	50.0
LPG	24.4	48
Gasoline	32.7	42.5
Diesel	37.7	42.5

Sumber : [2]



Gambar 2. Instalasi Terminal Penerima LNG [2]

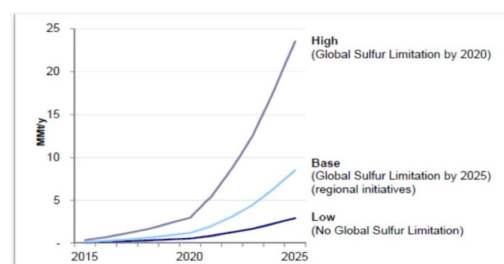
bunkering LNG yang potensial di Kawasan Timur Indonesia.

Marine Pollution (MARPOL) menetapkan persyaratan yang ketat di perairan laut Baltik, Laut Utara, laut Amerika Utara dan Karibia yang tergabung dalam *Emission Control Area* (ECA). Namun, ECA akan terus berkembang ke negara lain yang mungkin akan memberlakukan termasuk wilayah Asia Tenggara dalam waktu dekat.

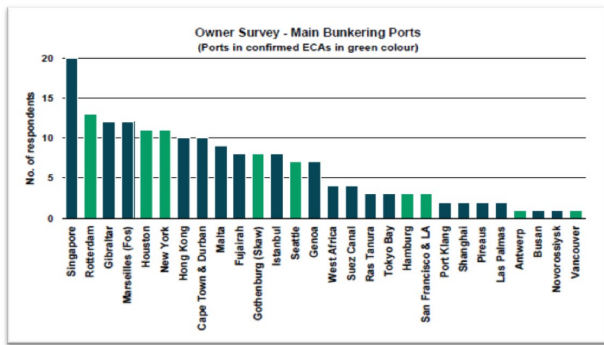
Batasan emisi maksimum untuk semua area SOx 3.5% dari bahan bakar laut. Emisi SOx daerah non-ECA juga direncanakan akan dibatasi sebesar 0,5% antara 2020 dan 2025, dimana penilaian kelayakan akan dilakukan pada tahun 2019. Batas target pelaksanaan antara tahun 2020 dan 2025 diperkirakan akan mendorong penggunaan LNG sebagai bahan bakar kapal di dunia gambar 3.

Survei penelitian sebelumnya untuk melihat pandangan dari sisi pemilik kapal terhadap lokasi bunker di sepanjang jalur perdagangan utama [4], menyimpulkan bahwa ada korelasi langsung antara lokasi *hub* bunkering utama dan jalur utama perdagangan. Mengingat perlu dibangun infrastruktur bunkering LNG yang berada di Pelabuhan Bitung serta memiliki potensi untuk memicu pertumbuhan penggunaan LNG sebagai bahan bakar *marine* di Kawasan Timur Indonesia.

Selanjutnya, survei tersebut juga mengindikasikan bahwa mesin LNG dan *dual-fuel* memiliki peluang jangka panjang terutama kepada pemilik kapal kontainer dan kapal pesiar [4]. Poin ini menjadi sangat penting bagi pengembangan bunker LNG di Pelabuhan Bitung mengingat menjadi jalur keluar masuknya sejumlah kapal kontainer internasional. Dari perspektif Asia, tercatat bahwa



Gambar 3. Proyek LNG fuel Impacted by Annex VI [3]



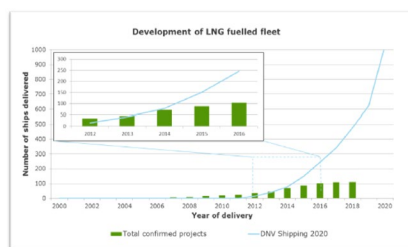
Sumber : [4]

Gambar 4. Lokasi Bunker Utama Dunia-Owner Survey

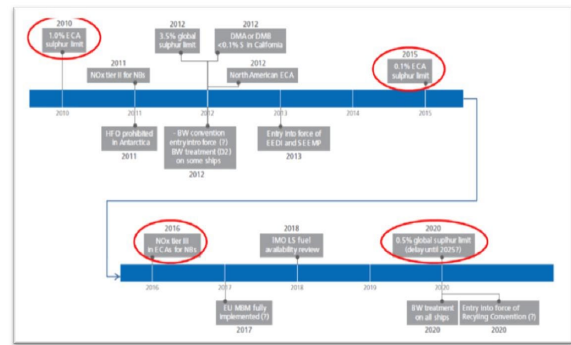
Singapura termasuk dalam 20 besar bunker utama LNG di dunia seperti ditunjukkan pada gambar 4. Ini menegaskan bahwa potensi permintaan LNG sebagai bahan bakar *marine* di Asia diposisikan menjadi salah satu jalur perdagangan utama.

Gambar 5 memberikan indikasi tren pengembangan armada kapal berbahan bakar LNG mulai meningkat pada tahun 2014 dengan proyeksi kenaikan yang signifikan. Hal ini akan berkontribusi terhadap permintaan LNG sebagai bahan bakar *marine*. LNG sebagai bahan bakar sudah terbukti dan menjadi solusi pengganti bahan bakar minyak. Sementara bahan bakar konvensional berbasis minyak tetap akan menjadi pilihan bahan bakar utama bagi sebagian besar kapal dalam waktu dekat kedepan. LNG sebagai alternatif bahan bakar dipicu oleh tekanan lingkungan untuk mengurangi gas rumah kaca serta harga bahan bakar minyak yang terus mengalami kenaikan. Peluang komersial dari LNG menarik peluang untuk bangunan kapal baru berbahan bakar gas dan proyek konversi BBM ke gas. Pembahasan berikut akan memberikan gambaran dan pemahaman faktor dasar penggerak LNG digunakan sebagai bahan bakar transportasi laut [5].

Organisasi Maritim Internasional (IMO) sudah memberlakukan regulasi lingkungan yang ketat mulai awal tahun 2015 lalu, dimana aturan untuk emisi SOx dan NOx dibatasi maksimal 0.1% untuk kawasan ECA (*Emission Control Area*) dan akan Roadmap penerapan regulasi kawasan ECA dari tahun 2010 – 2020 dapat dilihat pada (Gambar 6), namun dengan batasan emisi (SOx dan NOx) yang lebih longgar, yaitu maksimal 0.5% [5].



Sumber: [4]

Gambar 5. Pengembangan Armada Kapal Berbahan Bakar LNG

Sumber : [6]

Gambar 6. Regulations Roadmap Penerapan Kawasan ECA

Regulasi IMO mendorong tumbuhnya akan teknologi yang mampu mengurangi atau bahkan menghilangkan emisi mesin kapal. Pilihannya hanya dua, yaitu teknologi LNG *propulsion*, artinya menggunakan bahan bakar rendah karbon (*Low Sulphur* MGO atau LNG). Pilihan kedua adalah mengadopsi teknologi *scrubber*, dengan tetap menggunakan HFO sebagai bahan bakar. Secara ekonomis *total cost* LNG *propulsion* lebih rendah hingga 40% dibanding menggunakan MGO (*low sulphur*) dan HFO dengan *Scrubber*.

IGF *Code* adalah sebutan pendek dari “*International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flashpoint Fuels*” atau Aturan Keselamatan Internasional untuk Kapal yang menggunakan Bahan Bakar Gas atau Bahan Bakar dengan Titik nyala rendah). IGF *Code* akan berlaku efektif pada 1 Januari 2017 setelah berlakunya amendemen terhadap Chapter II-1, II-2 dan lampiran pada Annex SOLAS 1974. Pembahasan emisi SOx dalam *Regulation 14 of Marine Pollution Annex VI-Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships* diberlakukan emisi bahan bakar <4,5% untuk daerah *non-ECA* dan <0,1% pada daerah ECA tahun 2015. *Marine Pollution Annex VI* mulai diterapkan pada tanggal 01 Juli 2010 dan selanjutnya mampu mengurangi kandungan sulfur bahan bakar secara global di laut dari 4,5% menjadi 3,5%. Secara bertahap emisi SOx di daerah *non-ECA* akan dibatasi sebesar 0,5% antara tahun 2020 dan 2025. Batasan penerapan waktu pemberlakuan batasan nilai Sox serta penilaian kelayakan dapat dilihat pada gambar 7. Batas target pelaksanaan antara 0,5% tahun 2020 dan 2025 diperkirakan kedepannya akan meningkatkan penggunaan bahan bakar LNG di dunia [7]. *Regulation 13 (Nitrogen oxides (NO_x)) of Marine Pollution Annex VI-Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships* mendefinisikan batas emisi berdasarkan tahun konstruksi kapal dan kecepatan mesin dalam sistem Tier-III ditunjukkan dalam Tabel 2. Kapal dibangun antara tahun 2000 dan 2011 harus memenuhi emisi NOx dikecepatan maksimum mesin sekitar 9,8-17 gram per kilowatt-hour (g / kWh) (Tier I), yang

Tabel 2. Batasan NOx untuk Bangunan Baru [9]

Tier	Applicable areas	Construction Year	Nox Limit, g/kWh (n = rpm, below)		
			N<130	130 ≤ n < 2000	N ≥ 2000
Tier I	Global	2000	17.0	45 * n ^{-0.2}	9.8
Tier II	Global	2011	14.4	44 * n ^{-0.23}	7.7
Tier III	ECA	2016	3.4	9 * n ^{-0.2}	1.96

dibangun setelah 2011 harus mematuhi 7,7-14,4 g / kWh (Tier II), dan kapal beroperasi setelah 2016 dimana apa yang disebut NOx Pengendalian Emisi *Area* (Necas) perlu mematuhi emisi 1,96-3,4 g / kWh (Tier III) [8].

Particulate matter disingkat PM merupakan partikel kecil yang mengandung zat kimia yang terkondensasi (cair/padat). PM >10 mikrometer melalui mekanisme pernafasan dapat dikurangi dibandingkan PM < 10 berpengaruh terhadap efek kesehatan karena kemampuannya dapat mencapai daerah yang lebih dalam pada saluran pernafasan. Efek kesehatan manusia dari paparan PM meliputi: sistem pernafasan, kerusakan jaringan paru-paru, kanker, dan meningkatkan resiko kematian dini. Orang tua, anak-anak, dan orang-orang dengan penyakit paru-paru kronis, influenza, atau asma, sangat sensitif jika terpapar PM. Selain itu PM yang asam dapat mempengaruhi penglihatan dan menjadi penyebab utama berkurangnya jarak pandang manusia [10].

Ada sejumlah strategi memilih bagi pemilik kapal dalam memastikan pemenuhan persyaratan peraturan IMO, tiga pilihan utama meliputi penggunaan bahan bakar minyak rendah sulfur/*marine gas oil* (MGO), menggunakan *scrubber* untuk mereduksi gas buang (bahan bakar HFO) dan penggunaan LNG. Ketiga pilihan tersebut dianggap layak bergantung pada strategi dalam menentukan pilihan, jenis kapal dan pola perdagangan [4]. Disatu sisi menunjukkan bahwa pilihan dominan akan

Tabel 3. Perbandingan Pilihan Bahan Bakar Alternatif [9]

Alternative	Environmental features compared to the traditional HFO alternative				Factors influencing viability compared to the traditional HFO alternative		
	Sox	Nox	PM	CO2	Cargo capacity	Capital Investments	Operating Costs
LNG	++	++	++	+	Restricted	Very high	Low
MGO	+	-	-	-	restricted	Low	Very high
HFO/Scrubber	+	--	+	-	Slightly restricted	High	Medium

++ very good, + good, - bad, -- very bad

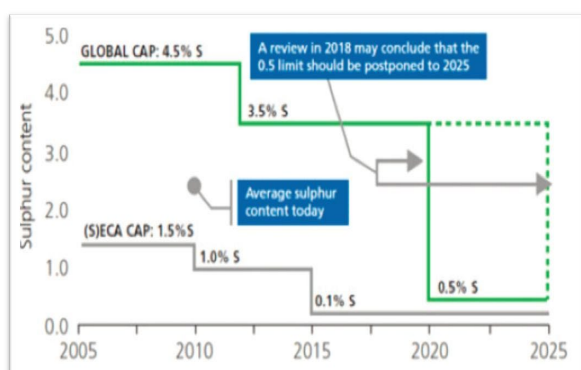
a) Fuel costs remain basically unchanged, a small increase (1-2%) can be expected.

Cost for scrubber maintenance and waste handling are yet unknown but may add to the total operating costs.

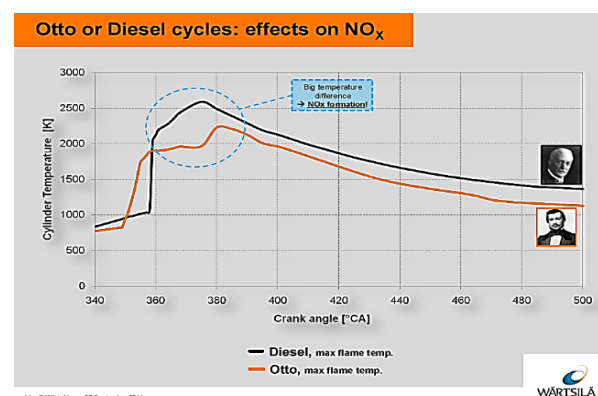
bergantung pada ekonomi (biaya investasi), faktor operasional dan harga bahan bakar yang paling penting di masa mendatang.

Motor diesel di kapal umumnya digunakan sebagai penggerak utama. Bahan bakar yang digunakan pada motor diesel juga sangat mempengaruhi intensitas dari gas buang yang dihasilkan. Pada umumnya bahan bakar yang digunakan untuk motor diesel adalah HFO (*Heavy Fuel Oil*), atau *Marine Diesel Oil* (MDO) yang memiliki viskositas yang tinggi dibandingkan bahan bakar lainnya sehingga kualitas gas buang yang dihasilkan sangat buruk. Gas yang dihasilkan seperti *carbon monoxide* (CO), *hydrocarbon* (HC), *carbon dioxides* (CO₂), *nitrogen oxides* (NO_x), PM serta *sulphur oxides* (SO_x). Semua gas tersebut diatas mempunyai dampak *Global Warming*, maka dari itu perlu diminimalkan kandungan gas yang berbahaya terutama kandungan NO_x. Dengan adanya *Exhaust Gas Recirculating* (EGR) yang di optimalkan dengan penambahan *water scrubber*, diharapkan dapat mengurangi Kadar NO pada gas buang tersebut [11].

MGO menawarkan alternatif dalam memenuhi persyaratan *Sulphur Emission Control Areas* (SECA) karena mengandung sulfur rendah dan mengurangi partikel yang diudara PM. Namun, sesuai dengan Nox dan persyaratan gas rumah kaca memerlukan aplikasi dari *selective catalytic reduction* (SCR) atau *exhaust gas recirculation* (ECR) untuk memenuhi level Tier III. Dibandingkan dengan LNG, MGO tidak



Sumber : [3]

Gambar 7. Batasan Waktu Penerapan Nilai Sox

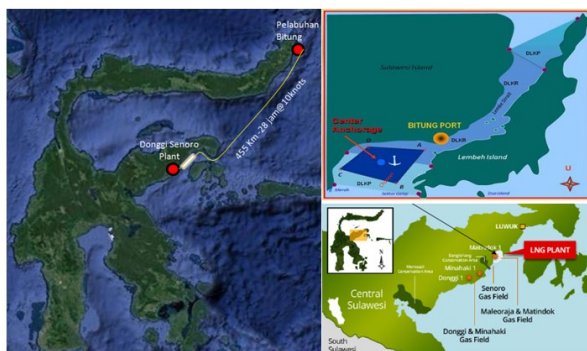
Sumber : [14]

Gambar 8. Perbedaan Temperatur Maksimum

memerlukan ruang tambahan tangki penyimpanan dan tidak ada biaya investasi. Namun, harga bahan bakar untuk MGO saat ini sudah tinggi dan prospeknya kedepan memperlihatkan peningkatan yang signifikan dibandingkan jenis bahan bakar lainnya [12]. Teknologi LNG diketahui terbukti baik dan sejumlah *stakeholder* memperoleh keuntungan baik dari segi biaya dan efisiensi mesin. Salah satu keuntungan utama menggunakan LNG sebagai bahan bakar adalah perawatan mesinnya yang mudah, pembakaran yang dihasilkan lebih ramah lingkungan jika dibandingkan jenis bahan bakar HFO atau jenis bahan bakar lain seperti MDO [1] Sebagai bahan bakar ramah lingkungan, menawarkan alternatif dalam memenuhi persyaratan Annex VI dalam mengurangi emisi SOx, NOx, PM dan CO.

Namun, ada beberapa kekurangan dimana ruang tanki LNG yang tinggi dapat mengurangi kapasitas ruang muat kapal. Kerugian utamanya yang teridentifikasi adalah ketersediaan LNG sebagai bahan bakar *marine* dibatasi oleh rantai pasok [7]. Terlihat LNG tidak cocok untuk kapal-kapal yang rutanya membutuhkan fleksibilitas. Peralatan LNG yang dibutuhkan mahal dan persyaratan mengutamakan tingkat keselamatan mengakibatkan penambahan fitur memerlukan biaya yang tinggi. Tabel 3 memperlihatkan keunggulan perbandingan pilihan bahan bakar alternatif.

Gas alam merupakan bahan bakar yang sangat baik untuk mesin pembakaran dalam karena memiliki sifat bahan bakar yang memungkinkan untuk merancang mesin berbahan bakar gas dengan efisiensi tinggi dan emisi gas buang yang rendah. Sifat teknis dari gas alam yang digunakan sebagai bahan bakar kapal adalah angka metana tinggi dan mudah bercampur dengan udara untuk mendapatkan campuran yang homogen, yang dapat menyebabkan pembakaran dengan kecepatan yang tinggi pada koefisien kelebihan udara yang tinggi [13]. Hal ini untuk menghindari terjadi temperatur maksimum yang tinggi dan tekanan maksimum yang tinggi, sehingga mengurangi emisi NOx sampai 90 % dibanding bahan bakar diesel, artinya bahwa



Sumber : [15],[16]

Gambar 9. Sumber Gas Donggi Senoro – Pelabuhan Bitung



Sumber : [9].

Gambar 10. Proses Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar

penurunan emisi NOx tergantung dari temperatur maksimum mesin. Gambar 8 memperlihatkan perbedaan temperatur maksimum menimbulkan efek pada NOx, juga memungkinkan efisiensi yang tinggi.

Tidak mengandung sulfur, karena itu tidak ada emisi SOx, dan tidak ada PM. Gas alam pada proses dicairkan menjadi LNG, unsur sulfur sudah terbang sehingga dapat dikatakan bahwa LNG tidak mengandung sulfur. Penggunaan gas alam untuk mesin-mesin dengan sendirinya akan mengurangi emisi-emisi dari bahan pencemar utama seperti CO, SOx dan PM dibandingkan apabila mesin-mesin tersebut menggunakan bahan bakar diesel, mengingat bahaya yang dapat ditimbulkan dari emisi bahan pencemar udara seperti NOx dan SOx dapat menyebabkan hujan asam (*acid rain*) yang merusak tanaman, CO2 dapat menyebabkan efek rumah kaca (*greenhouse effect*) yang selalu mendapat perhatian untuk dievaluasi oleh IMO dan PM dapat menyebabkan keracunan bagi manusia [14].

Tabel 4. Data IMO Emission Inventory.

Category	Size / type	No. of ships (2007)	Ave. GT	Ave. ME kW	Ave. per engine kW	AIS unique count (4)	AIS coverage (5)	Days at sea (1) Modeller d	Ave. ME load Modeller d	Ave. AEX running days (2)	Ave. AEX load Modeller d	Fuel type (3)
Cruise oil tanker	200,000+ dwt	494	155 685	24 610	1 034	514	99%	274	73%	450	50%	HFO
Cruise oil tanker	120,000-199,999 dwt	353	80 711	17 075	1 232	368	100%	271	80%	450	50%	HFO
Cruise oil tanker	80,000-119,999 dwt	651	56 921	12 726	769	685	101%	254	80%	450	50%	HFO
Cruise oil tanker	60,000-79,999 dwt	180	39 498	10 529	731	190	101%	238	70%	400	50%	HFO
Cruise oil tanker	10,000-59,999 dwt	245	24 290	7 889	729	229	91%	238	70%	400	50%	HFO
Cruise oil tanker	0-9,999 dwt	114	2 083	1 865	222	49	41%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
Products tanker	60,000+ dwt	198	46 775	12 644	780	215	99%	171	80%	450	50%	HFO
Products tanker	20,000-59,999 dwt	456	24 262	8 482	736	455	96%	171	66%	450	50%	HFO
Products tanker	10,000-19,999 dwt	193	9 723	4 640	535	147	75%	183	70%	400	50%	HFO
Products tanker	5000-9,999 dwt	466	4 264	2 691	291	306	63%	177	75%	400	50%	MDO/HFO
Products tanker	0-4999 dwt	3 959	1 056	1 032	123	909	23%	175	65%	400	50%	MDO/HFO
Chemical tanker	20,000+ dwt	1 010	24 917	9 027	837	1059	100%	251	80%	450	50%	HFO
Chemical tanker	10,000-19,999 dwt	584	9 357	5 161	623	621	95%	246	80%	400	50%	HFO
Chemical tanker	5000-9999 dwt	642	4 651	3 252	416	615	92%	246	76%	400	50%	MDO/HFO
Chemical tanker	0-4999 dwt	1 659	1 331	1 257	216	668	40%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
LPG tanker	50,000+ ctm	138	45 784	13 494	1 004	147	103%	273	70%	450	50%	HFO
LPG tanker	0-49,999 ctm	943	4 834	3 225	436	697	72%	180	65%	400	50%	HFO
LNG tanker	200,000+ ctm	4	135 846	37 322	3 210	8	100%	260	70%	450	50%	HFO
LNG tanker	0-199,999 ctm	239	90 993	24 592	2 610	251	98%	274	70%	400	50%	HFO
Other tanker	Other	402	2 030	1 522	210	163	41%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
Bulk	200,000+ dwt	110	114 519	17 224	704	101	97%	281	71%	450	60%	HFO
Bulk	100,000-199,999 dwt	486	83 619	15 108	697	695	99%	279	70%	450	60%	HFO
Bulk	60,000-99,999 dwt	1 513	39 548	9 912	540	1599	98%	271	70%	450	60%	HFO
Bulk	35,000-59,999 dwt	1 864	27 596	8 209	533	1859	96%	262	70%	425	60%	HFO
Bulk	10,000-34,999 dwt	2 090	15 351	6 436	458	1915	90%	258	70%	400	70%	HFO
Bulk	0-9999 dwt	1 120	1 942	1 532	237	382	34%	180	65%	400	60%	MDO/HFO
General cargo	10,000+ dwt	674	11 382	5 914	414	401	71%	260	80%	410	60%	HFO
General cargo	5000-9999 dwt	1 528	4 704	2 939	235	1171	76%	272	80%	410	60%	MDO/HFO
General cargo	0-4999 dwt	11 006	1 061	868	90	3553	32%	180	65%	380	50%	MDO/HFO
General cargo	10,000+ dwt, 100+ TEU	1225	15 641	7 882	628	1160	94%	240	65%	410	50%	HFO
General cargo	5000-9999 dwt, 100+ TEU	1 089	5 294	3 720	401	969	88%	180	65%	380	50%	MDO/HFO
General cargo	0-4999 dwt, 100+ TEU	1 486	2 724	1 860	249	1321	88%	180	65%	380	70%	MDO/HFO
Other dry	Reefer	1 239	4 998	4 941	551	930	75%	256	68%	360	60%	MDO/HFO
Other dry	Special	228	12 201	5 787	511	174	78%	235	65%	360	60%	MDO/HFO
Container	8000+ TEU	118	100 082	68 477	3 081	145	94%	241	67%	600	60%	HFO
Container	5000-7999 TEU	417	70 290	55 681	2 413	438	97%	247	67%	600	60%	HFO
Container	3000-4999 TEU	711	45 317	34 934	1 782	732	99%	250	65%	500	60%	HFO
Container	2000-2999 TEU	667	29 363	21 462	1 359	695	99%	251	65%	500	60%	HFO
Container	1000-1999 TEU	1 115	16 438	12 364	985	1157	98%	259	65%	450	60%	HFO
Container	0-999 TEU	1 110	6 967	5 703	600	1025	90%	180	65%	400	60%	MDO/HFO
Vehicle	4000+ ctm	398	51 549	13 137	1 034	419	97%	284	70%	300	70%	HFO
Vehicle	0-3999 ctm	337	20 561	7 971	671	289	86%	271	73%	300	60%	HFO

Sumber : [14]

Tabel 5. Faktor Emisi Mesin Bantu (AE)(g/kWh)

Engine	CO2	NOx	SO2	PM
Medium Speed Diesel	722	14,7	12,3	0,8

Sumber : [17]

Donggi Senoro LNG sebagai perusahaan hilir bertanggung jawab hanya untuk pengolahan gas alam menjadi LNG, serta memasarkannya kepada pembeli. Kilang tunggal DSLNG memiliki kapasitas produksi sekitar 2 juta ton per tahun dan menggunakan teknologi pencairan. Gas Alam tersebut dipasok dari lapangan gas PT. Pertamina EP wilayah Matindok, ditambah dari PT. PHE Tomori Sulawesi dan PT. Medco Energy E&P Tomori, dari lapangan gas Sulawesi di Blok Senoro-Toili.

Kilang Donggi Senoro LNG berdiri di atas lahan seluas lebih dari 300 hektar, di pesisir pantai yang menghadap Selat Peling, yang menawarkan jalur pelayaran di lautan yang dalam dari Surabaya dan Makassar ke Luwuk dan Manado. Proyek Donggi Senoro LNG merupakan investasi besar di Sulawesi Tengah yang akan menghasilkan banyak manfaat lebih bagi perekonomian Sulawesi Tengah melalui dampak bergulir di bidang sosial, ekonomi dan infrastruktur. Pelabuhan Bitung sebagai pelabuhan *hub* Internasional yang akan menunjang pertumbuhan ekonomi nasional, memiliki potensi dikembangkan infrastruktur bunkering LNG yang sumber gasnya berasal dari kilang Donggi Senoro gambar 9.

2. Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian dalam menentukan perkiraan emisi yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar dari mesin bantu (AE) selama *hotelling* dilakukan dengan menggunakan metodologi studi [9] sebagai acuan. Persamaan 1 digunakan untuk menghitung perkiraan emisi [1].

$$\text{Rumus : } \begin{aligned} FC &= P \times A \times LF \times \text{SFOC} \times EF \\ E &= FC \times EC \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana E adalah emisi kapal (gram); FC adalah konsumsi bahan bakar (ton); P adalah daya

Tabel 7. Estimasi Konsumsi Bahan Bakar (Ton)-Type HFO

Vessels Category	No of Ships	Av.AE kW	Inst.Power kW	Activ.hrs	Load Factor	Annual Outtake kW.h	SFOC g/kWh	Fuel Consumed (Tonnes)
Container 8000 + TEU	540	3.081	1.663.740	51.840	60%	51.748.968.960	220	11.384.773,2
General Cargo 10000 dwt+	300	414	124.200	28.800	60%	2.146.176.000	230	493.620,5
Oil Tankers 80000-199,999 dwt+	145	769	111.505	13.920	50%	776.074.800	230	178.497,2
Vehicle 0-3999 ceu	115	671	77.165	11.040	60%	511.140.960	230	117.562,4

Sumber: Hasil olahan data

Tabel 6. SFOC (g/kWh)

Engine age	Above 800 kW	Below 800 kW
Any	220	230

Sumber : [9]

terpasang (kW); LF adalah *load factor*; A adalah waktu operasi setahun (jam); SFOC adalah *specific fuel oil capacity* (gr/kWh); EF adalah faktor emisi (gr/kWh).

Konsumsi bahan bakar (HFO) untuk mesin bantu (AE) dapat ditentukan melalui proses pada (Gambar 10) untuk setiap kategori kapal. *Data IMO Emission Inventory* dapat dilihat (tabel 4). Digunakan untuk melihat kapasitas daya *Auxiliary Engine* (AE) dan *load factor* berdasarkan tipe kapal. Rata-rata kapasitas daya terpasang (P) diperoleh dengan mengalikan jumlah kapal di setiap kategori dengan daya rata-rata *auxiliary engine* (AE). Untuk memperkirakan besarnya daya tahunan (P_{Annual}) diperoleh dengan mengalikan daya terpasang (P) dengan waktu operasi tahunan (A) dikali dengan *load factor* (LF). Sehingga diperoleh total konsumsi bahan bakar (FC) dengan mengalikan besarnya daya tahunan (P_{Annual}) dengan SFOC. Perkiraan emisi dihitung dengan mengalikan konsumsi bahan bakar total dengan faktor emisi (EF). Beberapa sumber yang memuat berbagai data faktor emisi; Namun, dalam studi ini, faktor emisi yang digunakan [17].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Estimasi Emisi Pelabuhan Bitung

Waktu aktivitas menunjukkan jumlah jam kerja AE untuk kapal selama *hotelling*. Oleh karena itu, jumlah kapal untuk setiap kategori dikalikan 96 jam untuk menentukan konsumsi bahan bakar per tahun. Daya mesin bantu AE lebih dari 800 kW maka nilai SFOC yang digunakan 220 g/kWh. Sedangkan mesin bantu AE kurang dari 800 kW maka nilai SFOC yang digunakan 230 kW (tabel 6).

Tabel 8. Estimasi Emisi (Ton)

Vessel Categories	CO2	NOx	SO2	PM	Total
Container	8.219,8	167,4	140,0	9,11	8.536,0
General Cargo	356,4	7,3	6,1	0,39	370,1
Oil Tankers	128,9	2,6	2,2	0,14	133,8
Vehicle Carriers	84,9	1,7	1,4	0,09	88,1
Total	8.790,0	179,0	149,7	9,74	9.128,44

Sumber: Hasil olahan data

Tabel 9. Reduksi Emisi

Pollutant	CO2	NOx	SOx	PM	Total
MGO	8.790,0	179,0	149,7	9,74	9.128,44
LNG	6.592,5	9,0	15,0	1,46	6.617,9
Total	2.197,5	170,1	134,7	8,28	2.510,6

Sumber: Hasil olahan data

Besarnya *fuel oil consumed* diperoleh dengan mengalikan *annual outtake* kWh dengan SFOC dan 10^{-6} . Angka emisi untuk lalu lintas kapal di Pelabuhan Bitung ditentukan berdasarkan *vessels calls* kapal per tahun. Evaluasi hanya dibatasi pada kapal laut pada (tabel 7) dengan jumlah kapal yang mewakili untuk tiap kategori pada data IMO.

Emission inventory adalah Jika setiap kapal akan menghabiskan satu hari (24 jam) di pelabuhan menunggu untuk berlabuh dan tiga hari (72 jam) melakukan bongkar muat sehingga total waktu aktivitas (96 jam) untuk setiap kapal.

Perkiraan emisi (tabel 8) diperoleh dengan mengalikan *fuel oil consumed* (tabel 7) dengan faktor emisi AE (Tabel 5) dan 10^{-3} .

3.2. Keuntungan Lingkungan

Tinjauan literatur menunjukkan bahwa penggunaan LNG sebagai *marine fuel* akan mengurangi emisi gas buang kapal secara signifikan di dalam dan di luar wilayah studi. Secara khusus, LNG memiliki persentase potensi mereduksi emisi SOx hingga 90%, NOx sebesar 85%, PM sebesar 90% dan CO₂ 20-25% lebih rendah dari sumber bahan

Tabel 10. Faktor Biaya Eksternal Per Ton (USD₂₀₁₀)

Pollutant	Human Health	Ecosystem Quality	Climate Change	Total
SO ₂	6.300	200	0	6.500
NOx	5.700	1.000	0	6.700
PM	350.000	0	0	350.000
CO ₂	29	0	33	62

Sumber : [20]

Tabel 11. Konversi Inflasi EURO / USD

Currency year	Currency year	Reference
EUR ₂₀₀₀	0,9236	USD ₂₀₀₀ www.fxtop.com
USD ₂₀₁₂	1,2284	USD ₂₀₁₂ www.usinflationcalculator.com
EUR ₂₀₁₉	1,1558	USD ₂₀₁₉ Studi ini

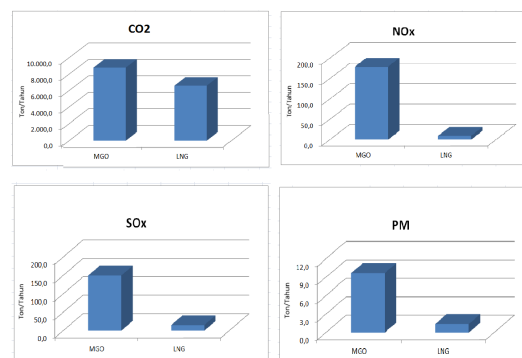
Tabel 12. Faktor Biaya Eksternal Per Ton (USD₂₀₁₂)

Pollutant	Human Health	Ecosystem Quality	Climate Change	Total
SO ₂	7.738,84	245,68	0	7.984,52
NOx	7.001,81	1.288,39	0	8.230,20
PM	429.935,80	0	0	429.935,80
CO ₂	35,62	0	40,54	76,16

Sumber : [19]

bakar lainnya [18]. Untuk mengevaluasi keuntungan lingkungan dari hasil reduksi emisi yang diperoleh terhadap kapal yang menggunakan LNG sebagai bahan bakar di Pelabuhan Bitung. Besarnya pengurangan emisi untuk setiap polutan dapat diperoleh dengan menggunakan tabel estimasi ton. Estimasi emisi total yang diperoleh dikurangi dengan besarnya persentase tiap polutan yang bisa direduksi saat menggunakan LNG. Hasilnya dilihat pada tabel 9.

Penelitian infrastruktur bunkering LNG, sebagai sampel sejumlah kapal yang menggunakan LNG sebagai bahan bakar secara signifikan mampu mereduksi emisi polutan lingkungan dan meningkatkan kualitas udara di sekitar pelabuhan. Hasil persentase grafik pada gambar 11 terlihat dari empat polutan yang dievaluasi dalam studi ini, pengurangan terbesar pada emisi SOx dan PM kemudian diikuti NOx dan CO yang menunjukkan

**Gambar 11.** Reduksi Emisi Pelabuhan Bitung

Tabel 13. Faktor Biaya Eksternal Per Ton (USD₂₀₁₉)

Pollutant	Human Helath	Ecosystem Quality	Climate Change	Total
SO ₂	7.281,54	231,16	0	7.512,70
NO _x	6.558,06	1.115,80	0	7.743,86
PM	404.530	0	0	404.530
CO ₂	33,52	0	38,14	71,66

Sumber: Hasil olahan data

Tabel 14. Biaya Total Eksternal

	Total (Ton)	Exiopol	Biaya Eksternal (USD)
CO ₂	8.790	71,66	629.891
NO _x	179	7.743,86	1.386.151
SO ₂	149,7	7.512,70	1.124.651
PM	9,74	404.530	3.940.122
Biaya Total Eksternal			7.080.815

Sumber: Hasil olahan data

pengurangan emisi terendah. Total emisi tahunan dari semua kapal akan berkurang dari 9.128,4 ton menjadi 6.617,9 ton, sehingga menghasilkan keuntungan lingkungan sebesar 2.510,6 ton setiap tahun atau 28%.

3.3. Biaya Eksternalitas

Ada banyak metode studi yang dilakukan di negara lain untuk memperkirakan biaya eksternal polusi udara disebabkan emisi kapal. Oleh karena itu, Tabel 12 [19] mengadopsi dan mengembangkan temuan tabel 14 Exiopol (2010) mencakup konversi EURO/USD pada (tabel 11) dengan menghubungkan terhadap aspek-aspek kesehatan, ekosistem dan perubahan iklim untuk menetapkan biaya eksternal emisi kapal, meskipun studi tersebut dilakukan di Eropa namun dapat digunakan sebagai sumber data yang bisa digunakan dalam penelitian ini. Dampak emisi kapal terhadap nilai aspek yang berdampak pada nilai keuangan dapat digambarkan dalam Tabel 13. Berdasarkan faktor biaya eksternal pada Tabel 13 diatas, dapat dihitung total biaya eksternal emisi kapal dalam Tabel 14.

4. Kesimpulan

Dari hasil analisis diatas menunjukkan kategori dan jumlah kapal menunjukkan hasil Analisis eksternalitas emisi kapal menunjukkan bahwa total emisi tahunan dari kapal akan berkurang dari 9.128 ton menjadi 6.617 ton, sehingga menghasilkan

keuntungan lingkungan sebesar 2.510 ton setiap tahun atau 28%; Evaluasi biaya eksternalitas menunjukkan bahwa emisi dari kapal-kapal jangkar dan sandar di Pelabuhan Bitung telah menempatkan biaya faktor eksternal sekitar 7.080.815 USD secara ekonomi terhadap Pelabuhan Bitung, masyarakat dan lingkungan; Angka yang digunakan untuk sejumlah kapal di pelabuhan dan jenis dan ukuran kapal yang dipilih hanya berdasarkan sampel data trend perkembangan kapal berbahan bakar LNG di dunia. Oleh karena itu, total emisi, biaya eksternal akan meningkat berbanding lurus dengan bertambahnya jumlah kapal yang beroperasi di pelabuhan; Hasil persentase grafik antara bahan bakar MGO dan LNG terlihat bahwa penggunaan reduksi emisi paling rendah dari empat polutan yang dievaluasi dalam studi ini, pengurangan emisi signifikan pada emisi SO_x dan PM kemudian diikuti NO_x dan CO yang menunjukkan pengurangan emisi terendah.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada PT. Pelabuhan Indonesia Cabang Bitung, Sulawesi Utara yang telah memberikan data-data sekunder yang diperlukan dalam kajian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Yanuar, MSc dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini. Semoga informasi penelitian ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Daftar Pustaka

- [1] Reza, "Terminal Penerima LNG dengan sistem regasifikasi terpadu," dalam Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [2] Mabote Elliot Motsoahole, Development of liquid natural gas bunkering infrastructure in South African ports, Sweden, 2014.
- [3] F. Adamchack and A. Adebe, "LNG as Marine Fuel," dalam Paper presented at the 17th International Conference and Exhibition of Liquefied Natural Gas, USA, 2013.
- [4] Aegesen, J, " LNG bunkering infrastructure study," dalam Lloyds Register, Denmark, 2012.
- [5] DNV GL, "Development and operating of LNG bunkering facilities Recommended Practice," 2014 October . [Online].
- [6] American Bureau of Shipping (ABS), "Bunkering of Liquefied Natural Gasfuelled Marine Vessels in North America," 2014.
- [7] DNV, Navigational and Safety Risk Assessment for Washington State Ferries, 2013.
- [8] European Environment Agency (EEA), "The impact of international shipping of European air quality and climate forcing," Copenhagen, Denmark, 2013.

- [9] International Maritime Organization, Second IMO GHG study 2009, London UK, 2009.
- [10] International Maritime Organization, "REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS FIFTY-THIRD SESSION," 2005.
- [11] Hendrajat, Muhammad, "Studi Experiment Penggunaan Water Scrubber Untuk Meningkatkan Kinerja Pada Sistem Exhaust Gas Recirculation (EGR) Dalam Menurunkan NOx Pada Motor Diesel," FKK ITS, Surabaya, 2011.
- [12] (DMA), Danish Maritime Authority, "North European LNG Infrastructure Project: A feasibility study for an LNG filling station infrastructure and test recommendations," Copenhagen, Denmark, 2012.
- [13] Ferox, "<http://www.chartindustries.com>," 2012. [Online].
- [14] O. Lavender, Dual Fuel Engine Latest Developments, Hamburg, 2011.
- [15] Patumpu Simamora, "Donggi Senoro LNG Project," Yogyakarta, 2014.
- [16] PT.Pelindo, "Rencana pengembangan Pelabuhan Makassar, bitung, balikpapan dan sorong," 2012.
- [17] ENTEC, "Defra UK Ship Emissions Inventory," London England, 2010.
- [18] Jonsdottir, "<http://www.lngbunkering.org/lng/environment/alternative-options>," 2013. [Online].
- [19] Peksen, N.H, "A new approach for Turkish port to reduce ship emissions," Turkey, 2013.
- [20] Moll, S., Acosta, J., Giljum, S., Lutter, S, "A New Environmental Accounting Framework Using Externality Data And Input-Output Tools For Policy Analysis," 2010.

Halaman ini sengaja dikosongkan