



Studi Rantai Pasok LNG: Pemanfaatan Gas Bumi sebagai Bahan Bakar Wahana Transportasi Laut

I Made Ariana, AAB Dinariyana DP, Dhimas Widhi H & Gede Bagus Dwi SA
Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Surabaya Jl. Arif Rahman Hakim, Sukolilo, Surabaya Indonesia
ariana@its.ac.id

Abstrak

Biaya kebutuhan bahan bakar di kapal merupakan komponen yang tertinggi dalam pengoperasian kapal. Salah satu upaya untuk mengurangi biaya kebutuhan bahan bakar ini adalah dengan menggunakan alternatif bahan bakar gas. Selain itu dapat menghemat biaya operasional kapal, penggunaan gas sebagai bahan bakar juga dapat mengurangi emisi kapal. Studi ini bertujuan untuk mengkaji penggunaan gas bumi menjadi bahan bakar di kapal dengan cara modifikasi sistem untuk fuel system kemudian menentukan lokasi bunkering LNG dan skema pengisian bahan bakar (bunkering) LNG. Analisis penentuan lokasi bunkering dilakukan dengan metode Greedy Random Search untuk mencoba semua alternatif dari semua variabel kemungkinan (possible variable). Hasil dari modifikasi adalah dengan menambahkan gas transfer dari replace menuju ke main engine meliputi LNG Replace, LNG Cryogenic Pump, Heat Exchanger, Gas Valve Unit (GVU), dan Conversion System. Pemilihan skema bunkering menggunakan pembobotan dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Alternatif lokasi bunkering yang terpilih adalah di pelabuhan Merak, Pelabuhan Ketapang Pelabuhan Lembar, Pelabuhan di Makassar, Pelabuhan di Surabaya, Pelabuhan di Sorong, Pelabuhan di Ambon, Pelabuhan di Semarang, Pelabuhan di Jakarta, dan Pelabuhan di Jayapura. Skema bunkering LNG yang dipakai pada setiap pelabuhan adalah Truck to Ship, sesuai dengan opsi yang terpilih.

Kata kunci: LNG, Dual Fuel Engine, Bunkering, Greedy Random, AHP

1 PENDAHULUAN

Konsep green port telah dikembangkan di beberapa pelabuhan internasional di Eropa dan Amerika. Konsep ini menonjolkan sisi eco-friendly selama operasi dari pelabuhan tersebut. Salah satu fokus dalam konsep tersebut adalah dengan mengurangi emisi yang bersifat polusi dengan menggunakan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan. Penerapan konversi penggunaan bahan bakar untuk kebutuhan operasional pelabuhan dan transportasi laut dari jenis MFO menjadi gas alam menjadi pilihan di beberapa pelabuhan tersebut. Selain lebih ramah lingkungan, dengan menggunakan gas bumi diperkirakan akan lebih ekonomis jika dibandingkan dengan bahan bakar yang lainnya. Hal ini sejalan dengan usaha untuk mengurangi biaya kebutuhan energi untuk mode transportasi ini. Sebagaimana diketahui bahwa biaya kebutuhan bahan bakar di kapal merupakan komponen yang tertinggi dalam pengoperasian kapal. Penggunaan gas bumi juga dapat mengurangi emisi gas buang dari mesin penggerak kapal.

Rencana penggunaan gas bumi menjadi bahan bakar di kapal, telah memberi harapan kepada pemilik armada pelayaran dalam mengurangi biaya produksi, sehingga lebih mampu bersaing dengan mode transportasi yang lain. Beberapa perusahaan pelayaran milik negara (BUMN) di Indonesia seperti PELNI dan ASDP, selain dituntut menjadi perusahaan yang kuat secara bisnis serta mengembangkan teknologi yang ramah lingkungan. Penggunaan gas bumi menjadi bahan bakar di kapal perlu dikaji lebih mendalam baik dari segi teknis maupun ekonomis. Secara teknis, kapal eksisting menggunakan motor diesel berbahan bakar minyak. Penggantian jenis diesel ini dengan jenis *dual fuel diesel engine* (DFDE) tentunya membutuhkan biaya, sehingga perlu dikaji mengenai kemungkinan modifikasi sistem bahan bakar dari bahan bakar minyak menjadi DFDE. Disamping itu, ketersediaan infrastruktur untuk mengisi bahan (*bunkering*) berupa gas alam di pelabuhan juga perlu diperhatikan untuk menunjang kegiatan di pelabuhan tersebut.

Dalam penelitian ini dilakukan analisa pemilihan skema bunkering dan optimasi lokasi bunkering berdasarkan rute pelayaran kapal penumpang yang dimiliki oleh ASDP dan PELNI. Pada bagian 2 dan 3 akan menjelaskan mengenai tinjauan pustaka dan metodologi yang dikembangkan dalam penelitian ini. Analisa pemilihan dan optimasi lokasi bunkering serta hasilnya selanjutnya dijelaskan pada bagian 4 dan 5.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rantai pasok LNG

Liquefied Natural Gas (LNG) adalah Gas Alam yang didinginkan sampai suhu -160°C pada tekanan atmosfer sehingga berubah fase menjadi zat cair dan memiliki efisiensi volume menjadi 1/600 dari kondisi aslinya semula sebagai gas (Soegiono and Artana, 2006). Dengan kondisi cair ini memungkinkan pengangkutan LNG dilakukan dalam jumlah besar dengan kapal tanker LNG. Sebelum gas alam dicairkan, terlebih dahulu partikel partikel asing dibersihkan dan diproses antara lain melalui desulfurization *dehydration* dan pembersihan karbon dioksida. Semua proses ini membuat gas menjadi tidak berwarna, transparan, tidak berbau, tidak beracun serta terhindar dari sulfur oksida dan abu. Karena terutama terdiri dari methane (CH_4), LNG mempunyai nilai kalor yang tinggi (12,000 kcal/kg) jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya seperti batu bara dan minyak bumi.

LNG *Supply Chain* atau rantai pasok LNG adalah proses sinergis untuk memproduksi, menyimpan, mentransportasikan dan mendistribusikan gas alam dari lokasi dimana gas diproduksi hingga menuju lokasi dimana gas akan digunakan. Rantai pasok LNG ini memiliki komponen sebagai berikut:

- Cadangan gas alam / sumur produksi (*gas well*)
- Kilang pencair gas alam (*liquefaction plant*)
- Terminal Muat beserta Tangki Penyimpan (*loading terminal*)
- Kapal pengangkut LNG (*LNG carrier*)
- Terminal penerima beserta tangki penyimpanan (*receiving terminal*)
- Unit regasifikasi (*regasification unit*)
- Konsumen Gas (*end user*)

2.2. Sistem Pengisian Bahan Bakar LNG (*LNG Bunkering*)

Bunkering merupakan proses pemindahan bahan bakar pada kapal. Pada umumnya, Bunkering dapat dilakukan dari sistem di darat menuju ke kapal, maupun dari kapal bunker ke kapal lain (Schinas and Butler, 2016). Proses bunkering dengan memindahkan bahan bakar gas pertama kali dilakukan di Port of Rotterdam dari truk bermuatan LNG ke kapal penumpang. Penggunaan LNG sebagai bahan bakar kapal perlu didesain sedemikian rupa sehingga mampu mencapai tingkat operasi yang aman. Dalam aplikasinya terdapat beberapa opsi dalam proses bunkering LNG menurut Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America [1], yakni:

• Dari sistem di darat ke kapal (*Onshore to ship*)

Konsep ini memerlukan sebuah dermaga yang khusus digunakan untuk proses *Bunkering* LNG. Dermaga tersebut dihubungkan dengan LNG *storage* yang terdapat di darat kemudian terdapat instalasi perpipaan untuk menghubungkan antara LNG *storage* yang ada di darat dengan kapal yang bersandar di dermaga. Dengan bantuan pompa, maka LNG dialirkan ke kapal melalui instalasi pipa tersebut. Selain dengan sistem perpipaan, *flexible hose* dan *crane* yang ada di dermaga dapat digunakan untuk membantu proses pengisian bahan bakar. Dapat digunakan juga manifold untuk mendistribusikan LNG ke tangki yang lainnya, misalkan truk bermuatan LNG.

Proses *Bunkering* dari *onshore* ke kapal pada umumnya merupakan pilihan yang tepat, apabila permintaan LNG untuk *Bunkering* di daerah tersebut besar, dan juga apabila direncanakan untuk investasi jangka panjang. Opsi ini juga dapat dimanfaatkan ketika di daerah tersebut juga terdapat konsumen lainnya yang memerlukan suplai LNG. Salah satu kelemahan apabila menggunakan opsi *Bunkering onshore* ke kapal ialah diperlukannya usaha yang besar dari kapal yang akan mengisi bahan bakar LNG untuk sampai ke dermaga lokasi *Bunkering*. Jadi hanya kapal dengan ukuran tertentu yang bisa bersandar di dermaga tersebut. Proses *Bunkering* dari *onshore* ke kapal sangat cocok digunakan untuk melayani kapal dengan frekuensi pelayaran yang tinggi dan permintaan yang cukup banyak.

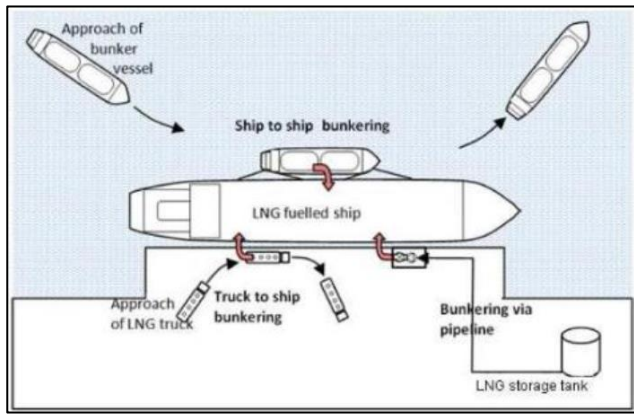
• Dari Truk LNG ke kapal (*Truck to ship*)

Diantara opsi lainnya dalam sistem *Bunkering* LNG, opsi dari truk ke kapal adalah yang paling banyak digunakan. Truk pengangkut LNG akan terhubung dengan kapal selama proses *Bunkering* melalui *flexible hose*. Untuk saat ini, *Bunkering* dengan opsi truk ke kapal paling banyak digunakan, karena masih minimnya permintaan LNG untuk bahan bakar kapal LNG untuk operasional kapal. Untuk itu, proses *Bunkering* truk ke kapal adalah cara yang efektif untuk sementara waktu. Truk yang digunakan dalam *Bunkering* dapat digunakan untuk distribusi LNG untuk keperluan lainnya. Namun untuk alasan kapasitas, proses *Bunkering* melalui truk ke kapal hanya cocok digunakan untuk kapal-kapal yang membutuhkan bahan bakar LNG dengan kapasitas kecil. Proses *Bunkering* dengan menggunakan opsi truk ke kapal sangat fleksibel dan sederhana. Tidak perlu harus dilakukan ditempat khusus, namun ditempat bongkar muatpun dapat dilakukan, selama tempat tersebut memadai.

• Dari Kapal LNG ke Kapal (*Ship to Ship*)

Bunkering dengan opsi dari kapal ke kapal dapat dilakukan hampir disetiap lokasi pelabuhan. *Bunkering* dengan opsi tersebut dapat dilakukan disepanjang dermaga ketika kapal sedang bersandar atau mungkin ketika kapal sedang labuh jangkar maupun di tengah laut. *Bunker vessel* akan tertambat dengan kapal kargo, bahkan jika memang di ijinakan oleh otoritas pelabuhan, proses *Bunkering* dari *bunker vessel* ke kapal kargo dapat dilakukan ketika kapal tersebut sedang

melakukan bongkar muat. Adapun kendala jika opsi *Bunkering* dilakukan dengan opsi ini adalah besarnya investasi yang harus dikeluarkan untuk pengadaan *bunker vessel* serta operasionalnya.



Gambar 1. Ilustrasi kegiatan Bunkering *ship to ship*, *truck to ship* dan *shore to ship*

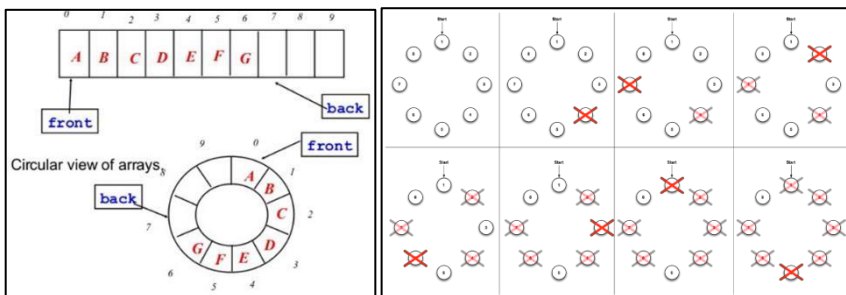
Setiap opsi yang digunakan, akan mempengaruhi waktu proses *Bunkering* LNG. Ukuran dan tipe kapal juga akan mempengaruhi lamanya waktu *Bunkering*. Hal tersebut dikarenakan setiap kapal pasti memiliki kebutuhan bahan bakar yang berbeda, tergantung dari daya mesin dan juga rute pelayarannya. Menurut *Danish Maritime Authority*, waktu paling lama yang diperlukan untuk proses *Bunkering* adalah dengan menggunakan opsi truk ke kapal [2].

2.3. Optimasi Lokasi Bunkering

Dalam perhitungan simulasi *Bunkering*, baik perhitungan untuk mengetahui kapasitas minimal tangki gas di kapal, skenario *Bunkering* kapal serta kapasitas serta lokasi pelabuhan *Bunkering*, digunakan beberapa metode dan pemodelan untuk membantu menyelesaikan permasalahan yang ada. Beberapa metode yang digunakan antara lain pemodelan *Circular Array*, *Josephus Problem* dan *Greedy Random Search*.

- **Pemodelan Circular Array**

Pemodelan circular array digunakan untuk memodelkan rute pelayaran sebuah kapal setiap roundtrip. Pemodelan circular array sedikit berbeda dengan pemodelan array linier pada umumnya, yaitu tidak adanya awalan (*front*) dan akhiran (*back*) array karena ujung dan akhiran berimpitan. Secara logika, dapat digambarkan seperti sebuah sabuk melingkar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari gambar berikut:



Gambar 2. Diagram Josephus Problem dan Circular Array

Dalam rute pelayaran sebuah kapal, setiap pelabuhan yang disinggahi dimodelkan sebagai poin A, B, C, D, E, F dan G. Pemodelan circular array ini kemudian akan digunakan dalam perhitungan sub-rute Bunkering untuk mencari kapasitas minimal tangki gas dikapal serta skenario lokasi pelabuhan serta urutan Bunkering. Perhitungan simulasi yang dilakukan menggunakan metode Josephus Problem yang akan dijelaskan di sub bab berikutnya.

Besaran setiap circular array berbeda untuk masing-masing kapal sesuai dengan rute pelayaran, kapasitas tangki gas di kapal, pemilihan sub-rute Bunkering dan juga lokasi pelabuhan tempat Bunkering.

- **Josephus Problem**

Josephus Problem adalah urutan eksekusi beberapa orang (N orang) yang berdiri secara melingkar untuk dieksekusi [3]. Titik mulai dan arah eksekusi serta jumlah pelewatan (*skip*) S orang dalam setiap eksekusi sudah ditentukan terlebih dahulu. Eksekusi akan tetap dilanjutkan dengan meneruskan jumlah skip setiap kali urutan eksekusi berakhir di akhiran urutan lingkaran. Orang terakhir yang tetap berdiri dalam lingkaran akan dibebaskan dari eksekusi. Untuk lebih jelasnya dapat diamati urutan eksekusi untuk konfigurasi 8 orang dan skip 3 orang.

Perhitungan awal simulasi *Bunkering* setiap kapal menggunakan pemodelan *circular array* dan penyelesaian Josephus Problem untuk mendapatkan alternatif skenario terbaik dari sekian banyak alternatif yang memungkinkan. Pada kondisi awal, perhitungan simulasi mengasumsikan bahwa semua pelabuhan memungkinkan untuk menerima *Bunkering* dari semua kapal. Perhitungan kemudian dilanjutkan dengan melakukan menggeser (*shifting*) titik mulai rute pelayaran kapal. Berbeda dengan penyelesaian Josephus Problem yang menggunakan skip secara konstan, variable skip dalam perhitungan

simulasi selalu berubah menyesuaikan posisi sisa gas di tangki gas di kapal. Bila jarak pelabuhan berikutnya terlalu jauh untuk dicapai dengan sisa gas di tangki, maka pelabuhan saat ini dipilih sebagai posisi *Bunkering*. Perhitungan dilanjutkan dengan menggeser satu pelabuhan sebagai lokasi mulai rute kapal sampai seluruh pelabuhan dalam sebuah rute telah digunakan dalam pergeseran titik mulai rute. Dari semua kombinasi pergeseran titik mulai rute akan didapatkan pelabuhan yang paling banyak digunakan sebagai lokasi *Bunkering*. Hasil pencarian lokal (*local search*) untuk setiap kapal kemudian akan digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya dengan *Greedy Random Search*.

Greedy Random Search

Greedy random search memulai pencarian solusi global dengan pencarian lokal terlebih dahulu (Yunianto and Setiyanto, 2014). Dari hasil pencarian lokal yang didapatkan kemudian dikompilasi untuk mendapatkan solusi global. Proses perhitungan simulasi *Bunkering* juga dimulai dengan pencarian lokal melalui perhitungan alternatif skenario *Bunkering* setiap kapal kemudian dilanjutkan dengan kompilasi hasil tersebut untuk semua kapal. Dari kompilasi tersebut kemudian akan didapatkan daftar pelabuhan yang paling banyak digunakan untuk *Bunkering* oleh semua kapal. Daftar pelabuhan tersebut kemudian digunakan untuk menghitung sekali proses pencarian lokal di setiap kapal dengan penambahan fitur “paksa *Bunkering*” dalam pencarian skenario *Bunkering*. Akhirnya, hasil perhitungan terbaru tersebut digunakan untuk menemukan solusi global untuk semua kapal. Untuk lebih jelasnya dapat diamati gambar berikut:

Penggunaan fitur “paksa *Bunkering*” adalah memaksa *Bunkering* pada kondisi sisa kapasitas tangki masih telah digunakan lebih dari 50%. Penggunaan fitur ini akan merubah skenario *Bunkering* setiap kapal yang telah dihasilkan sebelumnya sehingga akan merubah solusi global hasil kompilasi skenario semua kapal. Hasil inilah yang digunakan untuk menghitung kapasitas minimal tangki di setiap kapal, skenario sub-rute *Bunkering* setiap kapal, pelabuhan yang paling banyak dipakai untuk *Bunkering* dan kapasitas minimal tangki gas di setiap pelabuhan.

2.4. Analytical Hierarchy Process (AHP)

AHP merupakan suatu metode untuk membantu menyusun suatu prioritas dari berbagai pilihan dengan menggunakan beberapa kriteria (multi kriteria). Karena sifatnya yang multi kriteria, AHP banyak digunakan dalam penyusunan prioritas. AHP pertama kali diperkenalkan oleh Thomas L Saaty pada tahun 1971-1975 [4]. AHP memiliki perhatian khusus tentang penyimpangan dari konsistensi, pengukuran dan pada ketergantungan di dalam dan diantara kelompok elemen strukturnya. Secara garis besar ada 3 tahapan AHP dalam penyusunan sebuah prioritas.

- **Dekomposisi**

Setelah mendefinisikan permasalahan atau persoalan, maka perlu dilakukan dekomposisi, yaitu: memecah persoalan yang utuh menjadi unsur-unsurnya, sampai yang sekecil-kecilnya, sehingga didapatkan tingkatan dari persoalan tadi. Oleh karena itu, makan proses analisis ini dinamakan hirarki. Ada 2 macam hirarki, yaitu hirarki lengkap dan hirarki tidak lengkap. Pada hirarki lengkap semua elemen pada suatu tingkat memiliki semua elemen pada tingkat berikutnya jika tidak, maka dinamakan hirarki tak lengkap.

- **Comparative Judgement**

Prinsip ini berarti membuat penilaian tentang kepentingan relatif dua elemen pada suatu tingkat tertentu dalam kaitannya dengan tingkatan di atasnya. Penilaian ini merupakan inti dari AHP, karena akan berpengaruh terhadap prioritas elemen-elemen. Hasil dari penilaian ini lebih mudah disajikan dalam bentuk matriks Pairwise Comparison. Agar diperoleh skala yang bermanfaat, maka pihak yang memberikan jawaban perlu pengertian yang menyeluruh terhadap elemen-elemen yang dibandingkan dan relevansinya terhadap kriteria-kriteria yang dipelajari.

- **Synthesis of Priority**

Dari setiap matriks pairwise comparison kemudian dicari vektor eigennya untuk mendapatkan prioritas lokal, karena matriks pairwise comparison terdapat pada setiap tingkat, maka untuk melakukan global harus dilakukan sintesis diantara prioritas lokal. Prosedur melakukan sintesis berbeda menurut bentuk hierarki.

- **Logical Consistency**

Konsistensi jawaban responden dalam menentukan prioritas elemen merupakan prinsip pokok yang akan menentukan validitas data dan hasil pengambilan keputusan. Secara umum, responden harus memiliki konsistensi dalam melakukan perbandingan elemen. Jika $A > B$ dan $B > C$ maka secara logis responden harus menyatakan bahwa $A > C$, berdasarkan nilai numerik yang telah disediakan.

3 METODE PENELITIAN

Sebagai studi kasus dalam penelitian ini, kapal penumpang yang dimiliki oleh ASDP dan PELNI menjadi data masukan. Data Kapal yang digunakan adalah data pelayaran, konsumsi bahan bakar, karakter pelayaran, data penumpang dan muatan kargo, serta data operasional. Pada bagian selanjutnya akan dijelaskan mengenai konsep dasar untuk melakukan modifikasi mesin diesel menjadi *dual fuel engine*. Penelitian ini tidak menjelaskan spesifik modifikasi untuk dual fuel engine, namun menjelaskan konsep dasar bagaimana modifikasi atau konversi itu dilakukan. Data mesin dari kapal ASDP dan PELNI selanjutnya akan digeneralisasi untuk menghitung konsumsi bahan bakar ketika sudah dikonversi. Generalisasi terbagi menjadi mesin putaran rendah dan mesin putaran tinggi.

Data pelayaran berupa jadwal pelayaran dan tujuan pelayaran digunakan untuk membuat pola dalam menentukan lokasi bunkering. Data konsumsi bahan bakar digunakan untuk memperkirakan kebutuhan bahan bakar disetiap rute pelayarannya. Konsumsi bahan bakar selanjutnya dikonversi ke konsumsi bahan bakar gas, sehingga diketahui estimasi

kebutuhan bahan bakar gas alam untuk setiap rute pelayaran. Hasil analisa pola operasi dan konsumsi bahan bakar kemudian digunakan sebagai variabel masukan untuk optimasi lokasi bunkering dengan menggunakan algoritma greedy search. Algoritma ini digunakan untuk melakukan simulasi lokasi yang paling sering dikunjungi kapal (*most-hit-points*) untuk setiap rute kapal. Lokasi yang sering dikunjungi akan memiliki kemungkinan untuk dipilih sebagai lokasi bunkering. Simulasi terus dilakukan sampai dengan semua rute kapal terlayani, sehingga lokasi bunkering akan terpilih secara otomatis berdasarkan jumlah kunjungan kapal.

Metode pemilihan sumber gas alam dilakukan dengan menggunakan AHP. Dengan memanfaatkan forum diskusi bersama ahli dihasilkan penilaian secara kualitatif untuk setiap kriteria yang digunakan dalam pemilihan. Langkah selanjutnya memasukan nilai untuk setiap kriteria tersebut kedalam software Expertchoice. Dengan bantuan software tersebut akan didapatkan keputusan yang paling unggul berdasarkan nilai dari setiap kriteria pemilihan. Hasil optimasi lokasi bunkering dan pemilihan sumber bunkering akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

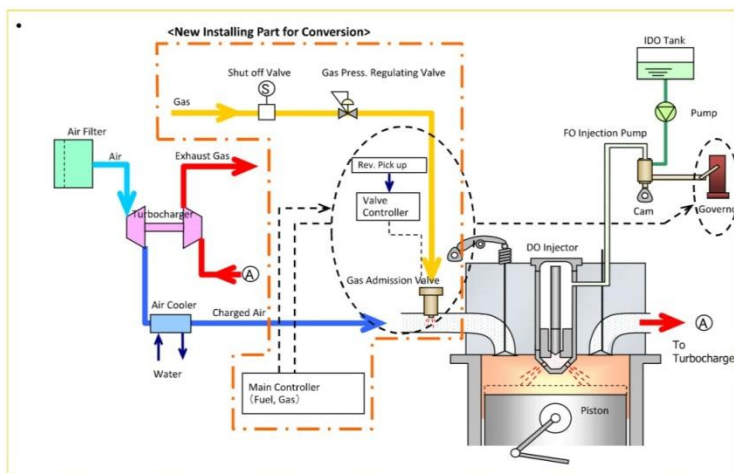
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Modifikasi Mesin dan Analisa permintaan Gas Bumi

Penggunaan bahan bakar gas sebagai bahan bakar utama pada mesin diesel akan memberikan efek pada kinerja mesin. Dengan titik terbakar (*Flash point*) yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar diesel, akan menyebabkan terbakarnya bahan bakar di ruang bakar sebelum piston mencapai titik batas atas. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada mesin jika dibiarkan terjadi terus menerus. Modifikasi sistem bahan bakar di mesin diperlukan untuk menjaga kinerja mesin tetap optimal. Pilihan untuk melakukan modifikasi mesin atau Konversi *dual fuel engine* akan membutuhkan penambahan komponen pendukung lainnya, sehingga mesin yang dimodifikasi mampu bekerja sesuai performa yang diinginkan. Tidak semua mesin dapat dilakukan modifikasi, hal ini akan sangat tergantung dari banyak parameter seperti kecepatan putaran mesin (RPM), tipe mesin, dan yang lainnya. Modifikasi atau konversi dari mesin diesel menjadi *dual fuel engine* dilakukan dengan menambahkan alat konversi yang biasanya terdiri dari:

- *Injection Control System* berfungsi sebagai alat pengatur injeksi gas ke inlet melalui gas admission valve. Input dari
- *injection Control system* berasal dari sensor yang dipasang pada flywheel dan camshaft, serta dari governor econ.
- *Bi Fuel Governor Econ* berfungsi untuk mengontrol besarnya bahan bakar yang diinjeksikan di inlet. Governor econ akan terhubung dengan sensor pada flywheel, dan inputan dari *bi fuel Control unit*. Dari governor econ nantinya akan memberikan input kepada *Injection Control system*.
- *Engine Control Unit InteliSys* berfungsi menerima inputan dari sensor yang terletak pada *flywheel*, dan juga *knocking detector*. Dari *Engine Control unit* ini nantinya akan memberikan inputan kepada *governor econ*
- *Knocking Detector* Berfungsi untuk mendeteksi adanya gangguan pada saat pembakaran sehingga *knocking* atau ketukan pada mesin dapat dihindari. Gangguan dapat dideteksi karena *detector* ini menerima data dari alat yang disebut *knocking sensor* yang terpasang pada *cylinder head*.

Untuk konversi menjadi dual fuel diesel engine, motor diesel putaran tinggi atau putaran diatas 1000 RPM dilakukan dengan jalan mencampurkan udara dan gas menggunakan Dual Fuel Mixer (DF Mixer) yang dipasang pada saluran udara sebelum turbocharger, sehingga DF Mixer yang terpasang hanya sejumlah turbocharger untuk melayani semua silinder. Sedangkan pada mesin dengan putaran rendah sampai dengan menengah (sampai dengan 1000 RPM) konversi mesin dilakukan dengan mengatur gas yang masuk menuju katup masuk ruang bakar melalui katup elektromagnetik yang berada sedekat mungkin dengan suction valves. Gas dimasukan melalui satu atau dua injector untuk setiap silindernya. Waktu buka/tutup dari kedua katup tersebut dikontrol secara terpisah oleh *injection Control unit*. Dengan karakter dari mesin putaran rendah yang sering mengalami overlap pada durasi yang cukup panjang, konfigurasi tersebut didesain untuk mencegah kejadian overlap. Apabila overlapping terjadi dapat mengakibatkan keluarnya gas yang belum terbakar dan kemungkinan keluarnya gas yang masih terbakar menuju saluran pembuangan. Hal ini akan menyebabkan mesin menjadi bergetar dan rusak. Menunjukkan konsep dasar dari konversi mesin menjadi dual fuel engine (DFDE).



Gambar 3. Konsep konversi dual fuel engine

Modifikasi mesin merupakan alternatif yang lebih memungkinkan untuk diterapkan pada kapal-kapal bekas, mengingat biaya modifikasi yang lebih rendah dari metode pertama. Penerapan metode ini tergantung dari jenis dan kondisi engine, serta kesesuaian dengan peralatan-peralatan modifikasi seperti converter unit yang digunakan. Dengan metode ini, pemakaian gas mencapai 50% -

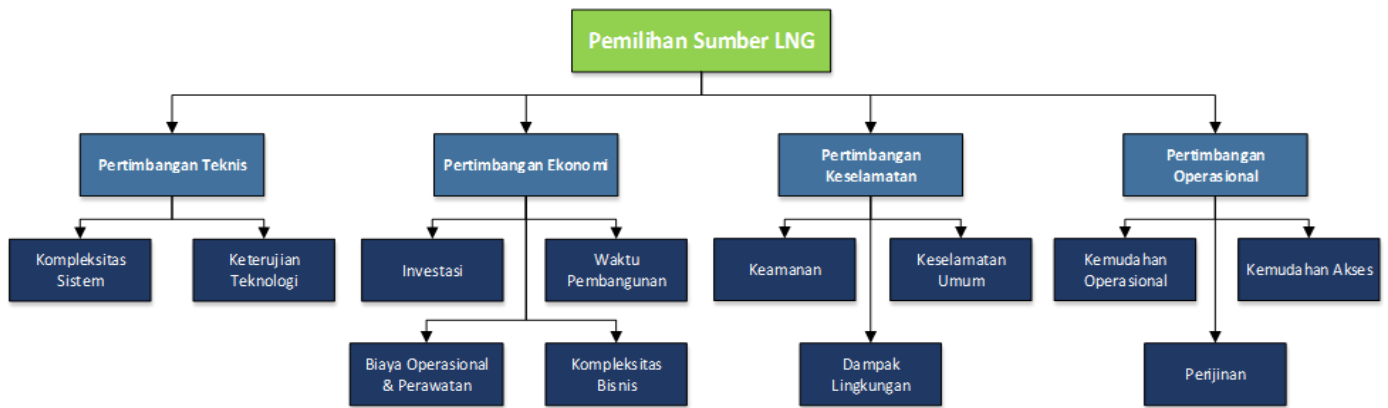
70% dari konsumsi energi bahan bakar. Dalam perhitungan potensi penggunaan gas sebagai bahan bakar ada beberapa nilai pendekatan yang diberikan yaitu:

- Konsumsi gas sebagai bahan bakar sebesar 50% dari konsumsi energi bahan bakar.
- Engine beroperasi pada beban normal yaitu sebesar 80% daya maksimum mesin.
- Pada kondisi idle, engine dioperasikan pada beban 20% daya maksimum mesin.
- *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) dari motor diesel sebesar 200 g/kWh atau 150 g/BHP-h
- Bahan bakar minyak / solar / HSD mempunyai nilai LHV sebesar 42.5 MJ/Kg
- Gross Heating Value (GHV) sebesar 10% diatas Low Heating Value (LHV) untuk gas

Dengan menggunakan asumsi diatas didapatkan total 23,158 mmbtu kebutuhan energi per hari dari kapal PELNI dan ASDP atau setara dengan 1,017.4 m³ LNG per hari. Nilai ini akan digunakan untuk melakukan optimasi lokasi bunkering yang dijelaskan pada bagian selanjutnya.

4.2. Pemilihan Sumber Gas Bumi dengan AHP

Dalam rantai pasok LNG ke lokasi *Bunkering* yang terpilih akan dilayani dengan memanfaatkan sumber LNG dari fasilitas darat berupa pipa gas alam yang dimiliki oleh PGN atau fasilitas *LNG plant* eksisting yang berada di Indonesia seperti FSRU Lampung, Bontang, Tangguh, dan opsi Makassar sebagai Hub distribusi LNG. Karena proses *Bunkering* menggunakan LNG maka fasilitas pipa gas akan memerlukan pembangunan fasilitas tambahan berupa *Liquefaction plant* yang bertujuan mengubah gas alam (fase gas) menjadi LNG.



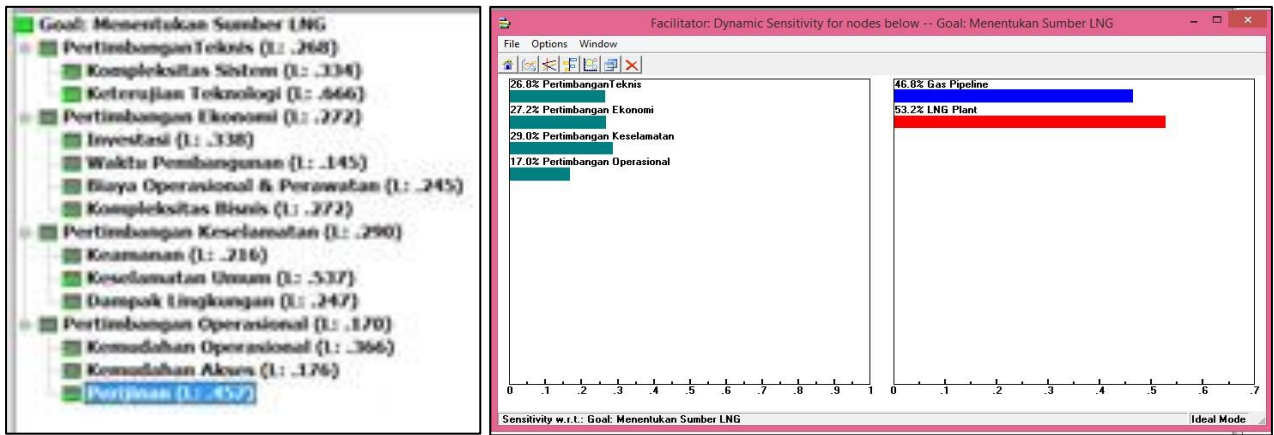
Gambar 4. Kriteria Pemilihan sumber gas bumi

Guna menentukan sumber LNG dalam distribusi menuju lokasi *Bunkering*, pemilihan dengan pendekatan pengambilan keputusan kriteria jamak (MCDM) digunakan dan Expert choice digunakan sebagai alat/tool untuk memilih. Dalam melakukan pemilihan sumber LNG ini secara kualitatif berdasarkan Pertimbangan Teknis dengan sub kriteria kompleksitas sistem dan keterujian teknologi; Pertimbangan Ekonomi dengan sub parameter waktu pembangunan, investasi pembangunan, biaya operasional, kandungan Lokal, dan kompleksitas bisnis; Pertimbangan Keselamatan dengan subkriteria keselamatan umum (*public safety*), keamanan (*security*) dan dampak lingkungan; Pertimbangan Operasional dengan subkriteria kemudahan operasional, kemudahan akses, dan parameter perijinan. Dengan mempertimbangan perbandingan kriteria-kriteria dalam pemilihan sumber LNG sebagaimana di uraikan di atas, maka penilaian subyektif terhadap perbandingan kriteria tersebut dapat dilakukan sebagaimana contoh penilaian pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Preferensi terhadap alternatif untuk setiap kriteria

Kriteria	Onshore Pipeline	LNG plant Eksisting
Kompleksitas sistem	♦♦♦♦	♦♦♦
Keterujian Teknologi	♦♦♦♦	♦♦♦♦
Investasi	♦♦♦	♦♦♦
Waktu Pembangunan	♦♦♦	♦♦♦♦
Biaya Operasional dan Perawatan	♦♦♦♦	♦♦♦♦
Kandungan Lokal	♦♦♦♦	♦♦♦
Kompleksitas Bisnis	♦♦♦♦	♦♦♦
Keamanan	♦♦♦	♦♦♦♦
Keselamatan Umum	♦♦♦	♦♦♦♦
Dampak Lingkungan	♦♦♦♦	♦♦♦
Kemudahan Operasional	♦♦♦	♦♦♦♦
Kemudahan Akses (Accessability)	♦♦	♦♦♦♦
Perijinan	♦♦♦	♦♦♦♦

Berdasarkan preferensi di atas, maka dengan menggunakan expert choice 11.0 diperoleh hasil pembobotan untuk masing- masing kriteria sebagaimana pada gambar berikut.



Gambar 5. Hasil pembobotan terhadap atribut pemilihan dan hasil pemilihan dengan Expertchoice

Berdasarkan hasil running di Expert Choice menunjukkan bahwa sumber LNG dari *LNG plant* Eksisting memiliki tingkat keterpilihan lebih tinggi dibandingkan dengan *Onshore Gas Pipeline*. Dengan demikian sumber LNG yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kilang LNG Bontang, Kilang LNG Dongi-Senoro, Kilang LNG Tangguh, FSRU Lampung, FSRU Makassar dan FSRU Muara karang.

4.3. Optimasi Lokasi Bunkering

Perhitungan diawali dengan memetakan konfigurasi rute *roundtrip* setiap kapal menjadi sebuah rute kontinu pulang pergi. Kebutuhan gas dari titik A ke B dan dari titik B ke A tidak sama, karena waktu sandar di masing-masing pelabuhan tidak sama, tergantung dari awalan sub-rute *Bunkering*. Kapasitas tanki minimal di setiap kapal dihitung dengan cara melakukan simulasi perjalanan semua alternatif sub-rute *Bunkering* terjauh. Jumlah berapa kali melakukan *Bunkering* ditentukan lebih dahulu sebagai variabel dasar melakukan simulasi perjalanan kapal.

Simulasi perjalanan kapal untuk mencari sub-rute *Bunkering* terjauh dilakukan secara berurutan (*sequential*) dengan memastikan bahwa urutan sandar di setiap pelabuhan tidak berubah. Pencarian secara berurutan dilakukan dengan metode sisipan tertentu (*interleave*) menggunakan metode *Josephus Problem* dan mendefinisikan rute kontinu sebagai *circular array*. *Circular array* digunakan dalam pemudelan rute rountrip sebuah kapal karena rute kapal bersifat kontinu berlanjut dari titik akhir ke titik awal. Ada sedikit perbedaan antara metode *Josephus Problem* awal dengan metode yang diterapkan dalam perhitungan, yaitu besaran sisipan (*interleave*) tidak ditentukan secara konstan (*fixed space*) akan tetapi mengikuti jumlah ketersediaan sisa gas akibat simulasi perjalanan kapal menyusuri sebuah alternatif sub-rute *Bunkering*.

Simulasi pencarian sub-rute *Bunkering* dilakukan melakukan *shifting* untuk semua pelabuhan di rute sebuah kapal, kemudian dicari pelabuhan yang paling banyak digunakan untuk *Bunkering* oleh semua alternatif skenario di setiap kapal. Setelah pelabuhan yang paling banyak digunakan untuk *Bunkering* oleh sebuah kapal diketahui, kemudian dipilih beberapa sub-rute *Bunkering* yang minimal menggunakan sekali sebuah pelabuhan tadi.

Pencarian lokal (*local search*) awal dilakukan dengan metode *Greedy Random Search* untuk mendapatkan semua alternatif sub-rute *Bunkering* untuk sebuah kapal. Hasil perhitungan awal ini selanjutnya digunakan untuk semua kapal guna mencari perpaduan sub-rute *Bunkering* setiap kapal dan penggunaan pelabuhan untuk *Bunkering*. Setelah alternatif sub-rute *Bunkering* global diketahui, maka akan didapatkan pelabuhan yang paling banyak digunakan untuk *Bunkering* oleh semua kapal.

Data pelabuhan yang paling banyak dipakai *Bunkering* ini kemudian digunakan lagi untuk mengulang proses perhitungan di langkah B dengan fitur tambahan memaksakan *Bunkering* di pelabuhan-pelabuhan yang telah terpilih. Penambahan fitur “paksa *Bunkering*” ini akan merubah alternatif sub-rute *Bunkering* setiap kapal, yang akhirnya juga akan merubah sub-rute *Bunkering* secara global untuk semua kapal. Hasil yang didapatkan dalam proses ini sudah memperhatikan kebutuhan *Bunkering* semua kapal dan juga lokasi *Bunkering* yang paling banyak digunakan oleh semua kapal. Dari perhitungan pencarian global (*global search*) semua alternatif sub-rute *Bunkering* setiap kapal, dapat direkapitulasi kebutuhan gas di setiap pelabuhan. Kebutuhan gas dari masing-masing kapal kemudian dijumlah untuk mendapatkan kebutuhan gas setiap pelabuhan. Dibawah ini menunjukkan hasil dari optimasi lokasi bunkering beserta rute, ukuran kapal dan investasi yang harus dikeluarkan.

Tabel 2. Hasil Optimasi Lokasi Bunkering

No.	Ships No.	Ship Capacity (m ³)	m ³ /Trip	RT (days)	Rute distribusi
1	Ship : 1	3,000	1,883	4	makassar-merak-tanjungpriok-muarakarang
	Ship : 2	6,000	5,381	12	muarakarang-semarang-surabaya-ketapang-lembar-ambon-sorong-jayapura-tangguh

2	Ship : 1	3,000	1,883	4	makassar-tanjungpriok-merak-muarakarang
	Ship : 2	6,000	5,381	12	muarakarang-semarang-surabaya-ketapang-lembar-ambon-sorong-jayapura-tangguh
3	Ship : 1	3,000	1,883	4	makassar-tanjungpriok-merak-lampung
	Ship : 2	6,000	5,381	12	lampung-semarang-surabaya-ketapang-lembar-ambon-sorong-jayapura-tangguh
4	Ship : 1	3,000	5,325	7	makassar-lembar-ketapang-surabaya-semarang-tanjungpriok-merak-makassar
	Ship : 2	6,000	1,748	8	makassar-ambon-sorong-jayapura-tangguh
5	Ship : 1	3,000	3,867	5	lampung-merak-tanjungpriok-semarang-surabaya-ketapang-makassar
	Ship : 2	6,000	2,604	10	makassar-lembar-ambon-sorong-jayapura-tangguh

Tabel 2 menunjukkan bahwa terdapat 10 lokasi bunkering yakni di pelabuhan Merak, Pelabuhan Ketapang Pelabuhan Lembar, Pelabuhan di Makassar, Pelabuhan di Surabaya, Pelabuhan di Sorong, Pelabuhan di Ambon, Pelabuhan di Semarang, Pelabuhan di Jakarta, dan Pelabuhan di Jayapura. Setiap pelabuhan tersebut akan disuplai LNG oleh kapal LNG dengan kapasitas 3000 m³ dan 6000 m³ dari sumber LNG di FSRU Makassar, FSRU Muara Karang dan FSRU Lampung.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penjelasan pada bagian sebelumnya, terdapat beberapa kesimpulan terkait kajian pemanfaatan gas bumi untuk transportasi laut, sebagai berikut ini:

- Modifikasi mesin menjadi dual fuel engine membutuhkan komponen peralatan tambahan yang disebut konverter untuk menyesuaikan suplai bahan bakar gas ke ruang bakar. Secara dasar perbedaan konsep modifikasi dibedakan berdasarkan RPM putaran tinggi dan RPM Putaran rendah.
- Berdasarkan perhitungan kebutuhan gas sebagai bahan bakar dan asumsi yang digunakan didalamnya terdapat potensi total
- 23,158 mmbtu kebutuhan energi per hari dari kapal PELNI dan ASDP atau setara dengan 1,017.4 m³ LNG per hari.
- Terdapat 3 alternatif untuk lokasi Bunkering untuk kapal ASDP dan 7 Alternatif penempatan Bunkering untuk dapat melayani operasional kapal-kapal PELNI. Alternatif lokasi Bunkering tersebut adalah di pelabuhan Merak, Pelabuhan Ketapang Pelabuhan Lembar, Pelabuhan di Makassar, Pelabuhan di Surabaya, Pelabuhan di Sorong, Pelabuhan di Ambon, Pelabuhan di Semarang, Pelabuhan di Jakarta, dan Pelabuhan di Jayapura.
- Berdasarkan hasil simulasi untuk distribusi LNG ke lokasi Bunkering dipilih sumber LNG berasal dari Kilang LNG Eksisting dengan distribusi menggunakan kapal LNG berkapasitas 3000 m³ dan 6000 m³ yang melayani 3 cluster distribusi LNG. Pemilihan metode Bunkering menunjukkan bahwa secara teknis seluruh pilihan metode Bunkering berupa Bunkering dari kapal ke kapal (Ship to ship), dari truk ke kapal (Truck to ship), dari tangki ke kapal (Storage tank to ship) dapat dilakukan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. O. SHIPPING, "Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America.," in *ABS (ed.), America: American Bureau of Shipping*, 2014.
- [2] T. N. TRANS-EUROPEAN, "North European LNG Infrastructure Project," in *UNIOR, E. (ed.). Danish Maritime Authority*, 2014.
- [3] W. J. LOH, P. K. K. & HSU, "The Josephus cube: A novel interconnection network," *Parallel Comput.*, vol. 26, pp. 427–453, 2000.
- [4] T. L. SAATY, "How to make a decision: The analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, pp. 9–26, 1990.