



# CINIA

The 2<sup>nd</sup> Conference on Innovation and Industrial Applications (CINIA 2016)

## Kajian Pengelolaan *Boil Off Gas* (BOG) dan Pemilihan Mesin Penggerak untuk Kapal LNG Carrier

Dhimas Widhi Handani<sup>1\*</sup>, I Made Ariana<sup>1</sup>, I Putu Shindu A2., Ayudhia Pangestu Gusti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dosen Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

<sup>2</sup>Dosen Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

<sup>3</sup>Mahasiswa Pascasarjana Teknologi Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

[dhimas\\_mareng@yahoo.com](mailto:dhimas_mareng@yahoo.com)

### Abstrak

Dalam pengoperasian kapal LNG, *Boil off gas* (BOG) yang dihasilkan dapat ditreatment untuk dirubah kembali menjadi LNG atau dapat dimanfaatkan untuk keperluan bahan bakar pada sistem penggerak utama. Penanganan BOG menjadi sangat penting dikarenakan dapat meningkatkan efisiensi operasional kapal, namun sebaliknya dapat menimbulkan kerugian secara ekonomi jika tidak dilakukan dengan tepat. Paper ini mengkaji penggunaan BOG yang dihasilkan oleh kapal LNG sebagai bahan bakar pada berbagai operasional mode (*Full speed, Economical speed, NBO speed, Pilotage, Drifting, Anchorage*). Mesin utama kapal yang digunakan pada kajian ini adalah *dual fuel diesel engine* (DFDE). Tujuan dilakukannya kajian ini untuk mendapatkan operasi kapal yang optimum saat proses penguapan *Natural Boiled Off Gas* (NBO) serta membandingkan tiga jenis *dual fuel engine* pada pengoperasian kapal LNG, yaitu DFDE, ME-GI engine dan X-DF engine. Metode yang digunakan pada kajian ini adalah perhitungan daya mesin kapal, perhitungan propeler, *engine propeller matching*, dan perhitungan konsumsi bahan bakar. Dari hasil kajian didapatkan bahwa kapal LNG yang saat ini dioperasikan mengkonsumsi bahan bakar lebih banyak dari pada operasi idealnya. Sedangkan dari perbandingan mesin dual fuel, ME-GI memperlihatkan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien.

*Kata kunci: Manajemen BOG, LNG Carrier, Dual Fuel Engine, Perbandingan Sistem Propulsi.*

## 1 PENDAHULUAN

Tangguh LNG berencana untuk meningkatkan kapasitas produksi *Liquefied Natural gas* (LNG) yaitu dengan cara mengembangkan Train III yang berkapasitas 4.1 MTPA dengan dibangunnya jetty II dan *jacket platform* (WDA dan ROA) dengan jalur pipa yang menghubungkan kedua platform tersebut dengan *offshore receiving terminal* (ORF). Dengan pengembangan tersebut, intensitas distribusi LNG ke pihak pembeli dengan menggunakan kapal LNG akan semakin tinggi. Tangguh LNG akan menambah armada kapal LNG untuk memenuhi kebutuhan transportasi LNG kepada pihak pembeli.

Dengan penambahan kapal LNG baru tersebut, perlu dilakukan analisa pengaturan BOG yang dihasilkan secara natural dari muatan LNG yang ada di dalam tangki muatan. Penelitian ini akan membahas analisa manajemen BOG yang akan digunakan untuk operasional kapal yaitu untuk bahan bakar mesin penggerak utama kapal LNG. Jenis mesin penggerak utama dari kapal LNG yang baru adalah dengan menggunakan *dual fuel engine*. Tipe mesin ini dapat dioperasikan dengan menggunakan bahan bakar gas ataupun *high speed diesel oil* (HSD). Tujuan dari lingkup penelitian ini adalah untuk mendapatkan operasional kapal yang optimal dengan menggunakan BOG pada beberapa jenis mode operasi kapal. Jadi, studi ini akan membahas tentang suplai BOG yang secara alami tersedia dan kebutuhan BOG untuk penggerak utama pada masing-masing mode operasi kapal LNG. Disamping itu, ada beberapa jenis *dual fuel engine* yang bisa dipilih untuk digunakan pada kapal LNG yang baru, yaitu DFDE, ME-GI dan X-DF engine. Pemilihan jenis motor penggerak utama kapal ini menjadi sangat penting terkait dengan secara teknis dan ekonomis akan memberikan dampak terhadap profit dari perusahaan. Paper ini juga akan membahas tentang perbandingan jenis mesin tersebut ditinjau dari aspek operasional.

Untuk mendukung penelitian ini, dibutuhkan data tentang sejarah operasi dari kapal LNG yang dioperasikan oleh Tangguh LNG saat ini dan mode operasinya untuk dihubungkan dengan konsumsi bahan bakar *dual fuel diesel engine*. Dalam rangka melaksanakan studi ini, data operasi selama tiga tahun dari kapal LNG telah didapatkan. Data-data operasional tersebut termasuk data kapal LNG Tangguh Batur, Tangguh Foja, Tangguh Hiri, Tangguh Jaya, Tangguh Palung, Tangguh Sago dan Tangguh Towuti. Selain analisa perbandingan antara BOG yang tersedia dengan konsumsi LNG, penelitian ini juga

melakukan perbandingan antara mesin yang sudah terpasang dengan mesin lain yang memungkinkan untuk dipasang pada kapal LNG yang rencananya akan dibangun.

Masalah yang dapat dirumuskan dari riset dengan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya adalah:

1. Sehubungan dengan ketersediaan BOG untuk bahan bakar dari kapal LNG, bagaimana manajemen bahan bakar pada pembangkit daya pada kapal tersebut untuk masing-masing mode operasi?
2. Dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, tipe *dual fuel engine* apa yang dapat memberikan keuntungan yang lebih besar pada operasional kapal LNG masa depan yang dibutuhkan untuk mengirimkan muatan LNG Train III?

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Gas alam harus diubah menjadi gas alam cair (LNG) dengan cara didinginkan sampai suhu  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sehingga mengkonversi gas alam ke bentuk cair (LNG). Proses dilakukan untuk mengurangi volume awal sampai 600 kali (Bahgat, 2015), sehingga memberikan keuntungan volumetric dalam transportasi LNG. Sedangkan dalam proses distribusi LNG dengan menggunakan kapal LNG, *boiled-off gas* (BOG) terbentuk sebagai akibat dari perpindahan kalor melalui insulasi tanki LNG pada kapal. Teknologi kapal LNG saat ini memungkinkan BOG untuk diinjeksikan kembali ke dalam tanki LNG dengan cara menurunkan kembali temperaturnya sehingga berubah kembali menjadi LNG. Sedangkan saat ini yang umum dilakukan adalah dengan memanfaatkan BOG sebagai bahan bakar pada motor induk kapal LNG. Dalam penanganan gas *boiled-off* perlu diperhatikan bahwa gas ini mengandung metana yang lebih ringan dari udara, ketika menggunakannya sebagai bahan bakar dan dalam kasus kebocoran, gas tersebut dapat keluar bebas di luar ruang mesin dan dapat meledak bila ada di sumber api [1].

Ada beberapa jenis system propulsi yang tersedia untuk LNG carrier. Berdasarkan sejarah kapal LNG yang telah dibangun di dunia, kita dapat melihat berbagai jenis propulsi utama. Jenis motor induk kapal LNG yang telah beroperasi didominasi selama bertahun-tahun oleh turbin uap, *dual fuel diesel electric* (DFDE) dan sistem langsung dengan sistem BOG (DRL). Sistem propulsi turbin uap telah menjadi sistem utama yang diimplementasikan pada kapal LNG sejak tahun 1960. Sistem ini memungkinkan pembakaran simultan antara bahan bakar *heavy fuel oil* (HFO) dengan BOG selama perjalanan, dimana secara bergantian menyuplai mesin turbin dan generator listrik [2].

*Dual fuel engine* memiliki dua mode operasi yang berbeda tergantung pada bahan bakar yang digunakan. Ketika gas dibakar sebagai bahan bakar (*gas mode*), mereka mengadopsi konsep siklus Otto[3]. Sedangkan pada *diesel mode*, menggunakan oil sebagai bahan bakar. Tipe dual fuel engine yang pertama kali dikenalkan adalah jenis DFDE. Untuk saat ini DFDE paling banyak digunakan dibandingkan dengan tipe *dual fuel engine* lainnya pada kapal LNG. Sedangkan ME-GI mulai dipergunakan pada beberapa kapal LNG, belum banyak pengalaman mengenai jenis mesin ini. Untuk Tipe X-DF saat ini masih dalam tahap pengujian kelayakan dalam penerapan untuk sistem propulsi pada kapal LNG. Pemilihan jenis sistem propulsi pada kapal menjadi bagian penting yang mempengaruhi nilai ekonomis dari investasi awal maupun tahap operasional kapal.

## 3. METODE PENELITIAN

- a. Perhitungan daya motor penggerak kapal

$$R_T = 0,5\rho C_t S V_s^2$$

Dimana  $R_T$  adalah tahanan total kapal,  $\rho$  adalah massa jenis air laut,  $V_s$  adalah kecepatan kapal,  $C_t$  adalah koefisien tahanan total dan  $S$  adalah luasan permukaan basah kapal

$$BHP = SHP / (\eta_G \eta_{Motor} \eta_{Transformer} \eta_{Generator})$$

Dimana  $\eta_{Motor}$  adalah efisiensi motor,  $\eta_{Transformer}$  adalah efisiensi transformator,  $\eta_{Generator}$  adalah efisiensi generator.

- b. Perhitungan propeller

Pemilihan propeller mempertimbangkan diameter propeller, efisiensi propeller dan kavitasi.

$$Bp_1 = N_{prop} SHP^{0,5} / Va^{2,5}$$

Dimana  $Bp_1$  adalah  $Bp$  adalah  $Va$  dan  $N_{prop}$  adalah putaran propeller

- c. Engine propeller matching

$$\alpha = R_T / (\rho V_s^2)$$

$$\beta = \alpha / ((1-t)(1-w)^2 D^2)$$

Karakteristik beban propeller diplotkan pada kurva  $K_T - K_Q - J$  sesuai dengan jenis propeller yang terpilih.

Berdasarkan karakteristik propeller load dan  $K_T - K_Q - J$ , data operasi mesin berupa  $N_e$  dan  $BPH_{engine}$  dapat diketahui.

- d. Konsumsi bahan bakar

Apabila BHP dari mesin diketahui untuk kecepatan kapal tertentu, maka konsumsi bahan bakar dapat dihitung. Konsumsi bahan bakar (LNG dan pilot fuel) untuk *dual fuel engine* dapat dihitung dengan menggunakan formula dibawah. Sementara *specific fuel consumption* (SFC) tergantung pada kurva konsumsi bahan bakar yang dipengaruhi oleh prosentase dari daya mesin.

$$\text{Konsumsi bahan bakar (pilot fluel)} = \frac{BHP \times sfoc \times t}{\rho_{HFO}}$$

$$\text{Konsumsi LNG} = (\text{BHP} \times \text{sfc} \times t) / \left( \frac{155870 \text{ kJ}}{\text{MMBTU}} \times \frac{22,56 \text{ MMBTU}}{\text{m}^3} \right)$$

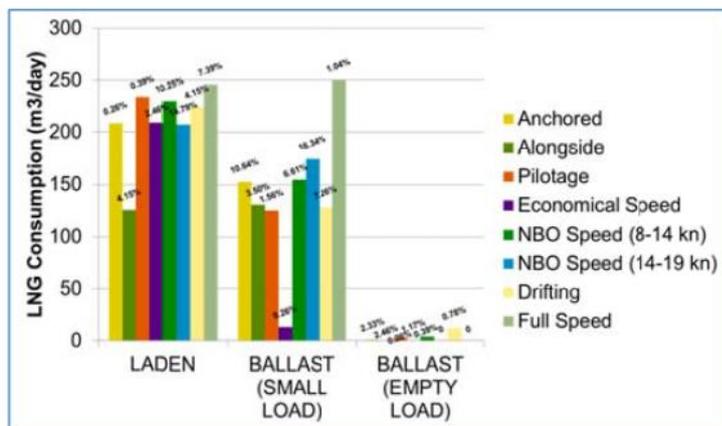
Break horse power (BHP) adalah besarnya daya mesin, SFOC adalah *specific fuel oil consumption*, t adalah waktu operasi dari mesin dan  $\rho_{FO}$  adalah jenis dari bahan bakar.

#### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari ketujuh kapal yang sedang dioperasikan oleh Tangguh LNG, dua diantaranya menggunakan motor penggerak turbin uap sedangkan lima yang lainnya menggunakan *dual fuel diesel engine* (DFDE). Ketujuh kapal tersebut adalah Tangguh Batur (turbin uap, 285 m, 145,000 m<sup>3</sup>), Tangguh Towuti (sister ship dari Tangguh Batur), Tangguh Hiri (DFDE, 288 m, 155,000 m<sup>3</sup>), Tangguh Sago (sister ship Hiri), Tangguh Foja (DFDE, 285 m, 155,000 m<sup>3</sup>), Tangguh Jaya (sister ship Foja) dan Tangguh Palung (sister ship Foja). Penggunaan bahan bakar dan ketersediaan BOG dapat dilihat pada hasil analisa berikut ini.

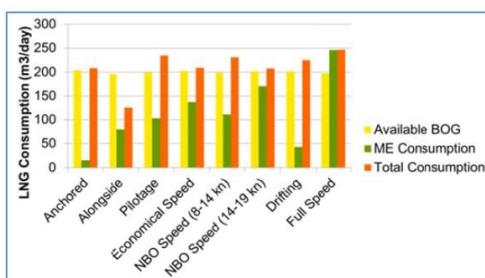
##### 4.1 Ketersediaan BOG dan konsumsi bahan bakar main engine

Analisa data dilakukan pada setiap kapal LNG yang dioperasikan oleh Tangguh LNG, meliputi kapal yang berpenggerak dengan menggunakan turbin uap dan DFDE. Untuk melakukan manajemen BOG, maka perlu diketahui jumlah konsumsi bahan bakar yang digunakan dan ketersediaan BOG yang ada pada kapal-kapal LNG tersebut. Berikut ini adalah hasil analisa data yang dilakukan untuk kapal Tangguh FOJA yang berpenggerak dengan jenis DFDE



Gambar 1. Konsumsi bahan bakar pada kapal Tangguh Foja

Gambar 1 menerangkan bahwa jumlah konsumsi bahan bakar bervariasi sesuai dengan *operasional mode* kapal yaitu *anchored*, *alongside*, *pilotage*, *economical speed*, *NBO speed*, *drifting* dan *full speed*. Kondisi laden adalah ketika kapal bermuatan penuh. Sedangkan kondisi ballast adalah ketika kapal tidak bermuatan. Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa mesin kapal memiliki konsumsi bahan bakar lebih tinggi jika dibandingkan dengan kondisi ballast. Operasional kapal dengan *full speed* menghasilkan konsumsi bahan bakar paling tinggi dibandingkan dengan jenis operasional mode yang lain baik pada saat kondisi laden ataupun ballast. Hal ini terjadi dikarenakan dengan pada kondisi *full speed*, operasional kapal menggunakan kecepatan tinggi sehingga tahanan kapal meningkat menjadi sangat tinggi. Kondisi ini meningkatkan kebutuhan tenaga penggerak kapal yang menyebabkan tingginya konsumsi bahan bakar. Sedangkan ketersediaan BOG pada kapal Tangguh Foja dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar ini menerangkan ketersediaan BOG dibandingkan dengan konsumsi bahan bakar pada setiap operasional mode kapal LNG Tangguh Foja. Dapat diketahui dengan jelas bahwa hampir pada semua kondisi operasi kapal, BOG dapat memenuhi kebutuhan bahan bakar DFDE. Sedangkan pada operasional mode *full speed*, ketersediaan BOG tidak



Gambar 2. Perbandingan ketersediaan BOG dan konsumsi bahan bakar pada operasi kapal Tangguh FOJA

mencukupi kebutuhan konsumsi bahan bakar. Sehingga diperlukan tambahan LNG untuk mencukupi kebutuhan bahan

bakar (*forcing*). Dengan demikian, dapat diperkirakan kebutuhan tambahan LNG untuk operasional kapal dengan tujuan perencanaan bahan bakar yang disediakan pada kapal. Manajemen BOG dan konsumsi bahan bakar dapat dilakukan dengan cara yang sama untuk jenis kapal LNG yang lainnya yang dioperasikan oleh Tangguh LNG.

#### 4.2 Pemilihan jenis penggerak kapal LNG

Analisa pertimbangan pemilihan jenis penggerak utama pada kapal LNG sangat penting untuk dilakukan khususnya pada study ini untuk menjadi pertimbangan pada pembangunan kapal yang baru. Untuk melakukannya diperlukan pertimbangan secara ekonomis dan teknis operasional pada masing-masing jenis penggerak. Pada paper ini akan melihat secara khusus dari segi keekonomisan penggunaan bahan bakar yang dikonsumsi oleh mesin penggerak kapal LNG yang akan dipilih. Ada beberapa jenis mesin penggerak yang bisa dipilih, diantaranya adalah turbin uap, *dual fuel diesel engine* (DFDE, ME-GI dan X-DF). Dari beberapa jenis penggerak tersebut, akan dibandingkan konsumsi bahan bakarnya berdasarkan data yang diperoleh dari data nyata kapal yang dioperasikan oleh Tangguh LNG. Adapun hasil analisa dari data yang telah diperoleh adalah sebagai berikut.

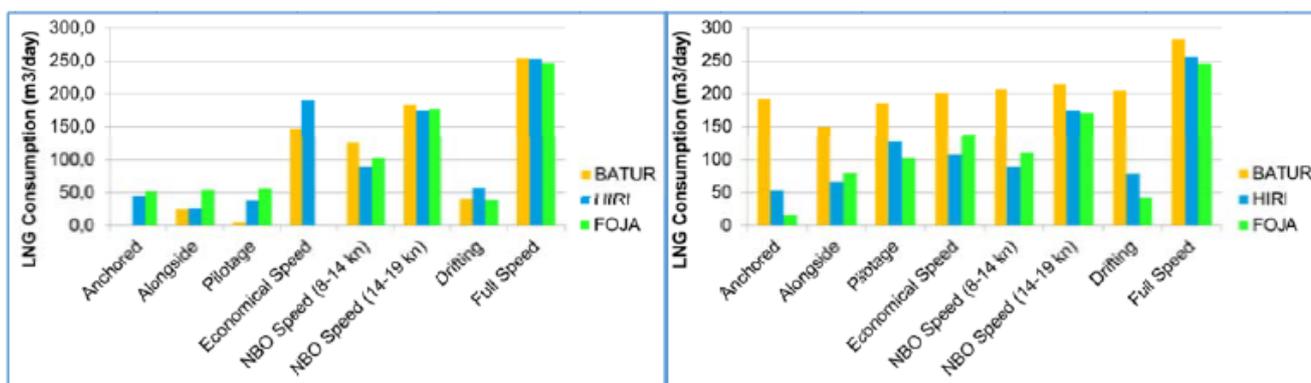
##### a. Analisa konsumsi bahan bakar pada kapal turbin uap (*steam turbine*)

Terdapat dua kapal yang dioperasikan oleh Tangguh LNG yang menggunakan turbin uap sebagai penggerak utamanya, yaitu Tangguh Batur dan Tangguh Towuti. Dua kapal tersebut memiliki dimensi yang sama, LOA sebesar 285.4 m dan Gross tonnage sebesar 97432 Ton. Dari data yang didapatkan, konsumsi bahan bakar dari kapal Tangguh Towuti memiliki kemiripan dengan yang dimiliki oleh Tangguh Batur. Kedua kapal tersebut memiliki kecenderungan untuk menggunakan bahan bakar minyak sebagai bahan bakar yang dominan ketika tidak ada LNG atau hanya sedikit yang tersedia. Bahan bakar yang digunakan akan dialihkan dari bahan bakar minyak menjadi LNG sebagai bahan bakar yang dominan ketika jumlah kapasitas LNG besar. Konsumsi tertinggi LNG untuk mesin penggerak utama pada dua kapal ini juga terjadi ketika mode operasi pada kecepatan penuh (*full speed*) dan memuat LNG dalam jumlah banyak (*laden*). Total rata-rata konsumsi bahan bakar tertinggi per hari adalah 309 m<sup>3</sup> dimana konsumsi bahan bakar tersebut terjadi pada saat kondisi kecepatan penuh (*full speed*) dengan muatan penuh (*laden*).

##### b. Analisa konsumsi bahan bakar *dual fuel diesel engine*

*Dual fuel diesel engine* digunakan dalam lima kapal Tangguh LNG, yaitu Tangguh Foja, Jaya, Palung, Hiri dan Sago. *Dual fuel diesel engine* yang digunakan pada ketujuh kapal ini adalah *dual fuel diesel electric* (DFDE). Tangguh Foja, Jaya dan Palung adalah sister ship dengan dimensi yang sama. Tangguh Hiri dan Tangguh Sago juga merupakan sister ship juga memiliki dimensi yang sama. Ada dua mode operasi mesin pada DFDE, yaitu *gas mode* dan *diesel mode*. Pada kondisi *gas mode*, *dual fuel diesel engine* menggunakan gas dan sedikit bahan bakar minyak sebagai *pilot fuel*. Sedangkan pada mode diesel, mesin jenis ini hanya menggunakan bahan bakar minyak untuk mengoperasikan diesel engine.

Berdasarkan data, dapat disimpulkan bahwa rata-rata konsumsi bahan bakar tertinggi terjadi saat kapal dioperasikan pada kecepatan penuh. Konsumsi bahan bakar pada kondisi lain relative lebih rendah. Saat kapal yang dioperasikan untuk *lego jangkar*, *alongside*, *pilotage* dan *drifting*, rata-rata konsumsi LNG lebih kecil dari 100 m<sup>3</sup> per hari. Sementara rata-rata konsumsi LNG pada mode kecepatan NBO dan mode kecepatan ekonomis adalah sekitar 100 dan 200 m<sup>3</sup> per hari, khususnya saat muatan terlalu besar. Apabila muatan terlalu kecil, rata-rata konsumsi LNG berada di bawah 100 m<sup>3</sup>.



Gambar 3. Perbandingan konsumsi bahan bakar motor penggerak turbin uap dan DFDE (a. Kondisi ballast, b. Kondisi laden)

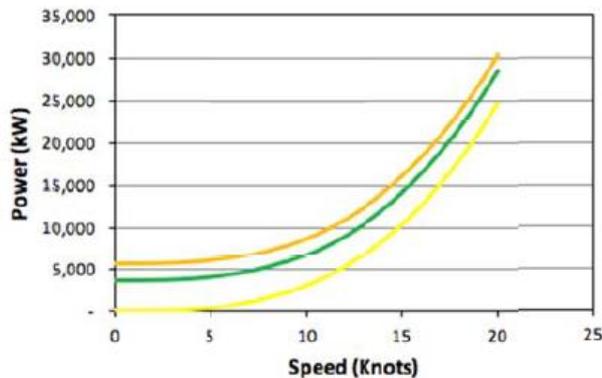
##### c. Perbandingan konsumsi bahan bakar antara motor penggerak turbin uap dan kapal DFDE

Pada bagian ini akan dilakukan perbandingan langsung antara konsumsi LNG pada mesin penggerak utama antara kapal bertenaga turbin uap dan kapal berpengerak DFDE. Perbandingan konsumsi bahan bakar turbin uap dan DFDE dapat dilihat pada Gambar 3. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa berdasarkan data nyata dari operasional kapal LNG berpengerak turbin uap dan DFDE yang dioperasikan oleh Tangguh LNG, kecenderungan untuk lebih tinggi pada konsumsi bahan bakarnya terjadi bila kapal LNG berpengerak turbin uap. Pada Gambar 3 terlihat jelas bahwa Tangguh Batur mengkonsumsi LNG paling tinggi di semua mode operasi pada kondisi muatan penuh (*laden*). Sedangkan pada

kondisi ballast, Tangguh Batur memiliki konsumsi LNG paling tinggi pada saat *full speed*. Dapat disimpulkan juga bahwa kapal dengan DFDE lebih menguntungkan dari pada kapal dengan berpengerak turbin uap hampir pada semua mode operasi kapal LNG.

d. Perbandingan konsumsi bahan bakar *DFDE dan ME-GI*

Saat ini DFDE dan ME-GI merupakan dua tipe mesin berbahan bakar ganda yang keduanya adalah yang paling sering dipakai untuk mesin penggerak utama pada kapal LNG. Pada studi kali ini, dua mesin tersebut akan digunakan dalam pemilihan mesin berbahan bakar ganda sebagai system penggerak kapal. Untuk melakukan perbandingan ini, perlu diketahui aspek konsumsi bahan bakar pada setiap jenis mesin tersebut. Dalam langkah ini, perhitungan tahanan, daya dan konsumsi bahan bakar untuk DFDE dan ME-GI akan dilakukan, begitu juga dengan perbandingan keuntungan dari segi ekonomi apabila dibandingkan dengan kebutuhan bahan bakarnya.



Gambar 4. Kecepatan vs daya DFDE

Hasil perhitungan BHP dari DFDE ditunjukkan dalam Gambar 4. Garis kuning mengindikasikan kebutuhan power untuk psistem propulsi utama berdasarkan kecepatan kapalnya. Sedangkan garis warna hijau dan oranye adalah kebutuhan daya sistem propulsi utama ditambahkan dengan kebutuhan daya permesinan bantu (warna hijau : dengan menggunakan dua genset, warna oranye : dengan menggunakan tiga genset). Gambar 4 tersebut merupakan grafik kebutuhan daya untuk kapal LNG dengan kapasitas 185,000 m3 dengan desain kecepatan dinas 19.5 knots. Adapun perbandingan kebutuhan daya mesin jika menggunakan DFDE dan ME-GI dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel tersebut menunjukkan alternatif konfigurasi pemilihan mesin jika menggunakan jenis DFDE dan ME-GI. Pembangkit tenaga jenis ME-GI berbeda apabila dibandingkan dengan jenis DFDE. Pada susunan jenis MEGI, tenaga yang dibutuhkan untuk system penggerak terpisah dengan tenaga yang dibutuhkan untuk mesin bantu. Pada DFDE tidak diperlukan mesin bantu dikarenakan kebutuhan daya sistem penggerak utama dan mesin bantu secara keseluruhan telah diakomodasi oleh DFDE. Berbeda halnya jika menggunakan ME-GI. Selain dibutuhkan ME-GI sebagai sistem propulsi utama, juga membutuhkan mesin bantu untuk memenuhi kebutuhan tenaga peralatan auxiliary.

Tabel 1 Susunan pembangkit daya dari DFDE dan MEGI

	DFDE 1	DFDE 2	MEGI
Sistem penggerak utama	2 X Wärtsilä 12V 50DF, 11,400 kW 2 X Wärtsilä 9L 50DF, 8550 kW	3 X Wärtsilä 12V50DF, 11400 kW 1 X Wärtsilä 6L50DF, 5,700 kW	2 X MAN B&W 5G70ME-C9.5-GI, 18,200 kW
Sistem bantu	N/A	N/A	3 X Wärtsilä 6L34DF, 3,000 kW (1 genset standby)
Total daya	39,900 kW	39,900 kW	42,400 kW

Mengacu pada total kebutuhan daya, susunan pembangkit tenaga jenis ME-GI dan DFDE juga dapat ditemukan pada table tersebut. Berdasarkan dua jenis susunan tersebut kemudian dihitung perbandingan antara dua mesin ME-GI dan DFDE.

**Engine propeller matching**

*1. DFDE dengan single screw propeller*

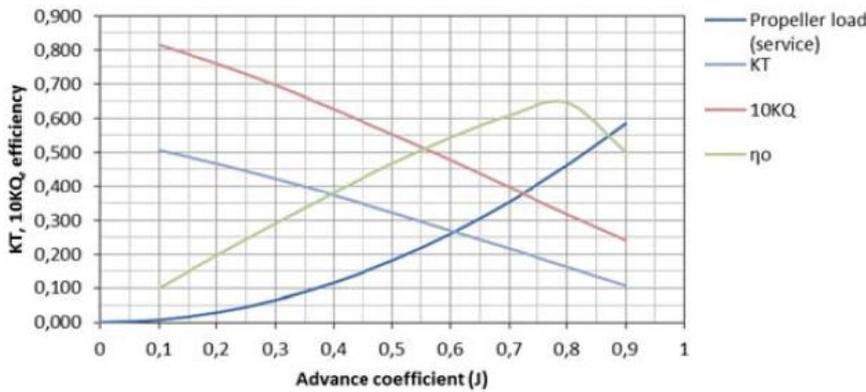
Jenis propeller tidak bisa didapatkan pada data kapla LNG yang akan dibangun oleh Tangguh LNG. Hanya data jumlah baling-baling dan diameter propeller saja yang tersedia sehingga pemilihan propeller dilakukan dengan menggunakan data-data tersebut. Table 1 menjelaskana mengenai proses pemilihan propeller. Tipe, jumlah baling-baling, diameter dan efisiensi ropeller yang terpilih dapat dilihat di dalam Table 2.

Table 1 Pemilihan propeller

Type	P/Do	1/Jo	δo	Do(ft)	Db(ft)	D <sub>max</sub> (ft)	D <sub>b</sub> < D <sub>max</sub>	b(m)
B5-45	0,890	1,6700	169,11	28,35	27,22	25,96	Decline	8,30
B5-60	0,871	1,6900	171,14	28,69	27,54	25,96	Decline	8,40
B5-75	0,876	1,6780	169,92	28,49	27,35	25,96	Decline	8,34
B5-90	0,909	1,6550	167,59	28,10	26,97	25,96	Decline	8,22
B5-105	0,975	1,5750	159,49	26,74	25,67	25,96	Accept	7,82

Table 2 Propeller terpilih

Type	δ <sub>b</sub>	1/J <sub>b</sub>	P/D <sub>b</sub>	η <sub>b</sub>
B5-105	15,114	1,12	1,060	0,6



Gambar 5 Kurva beban propeller diplotkan pada kurva KT-Kq-J dari propeller yang dipilih

Gambar 5 adalah proses pengambilan titik potong antara kurva beban propeller dengan kurva Kt-Kq-J yang sesuai dengan jenis propeller yang dipilih, yaitu tipe B5-105. Hasil dari proses tersebut dapat dilihat dalam Tabel 2. Total daya yang dibutuhkan untuk system penggerak utama adalah sebesar 30,631 kW dengan menggunakan satu propeller.

Tabel 2. Kebutuhan daya dari DFDE pada kondisi kecepatan 19.5 Knot

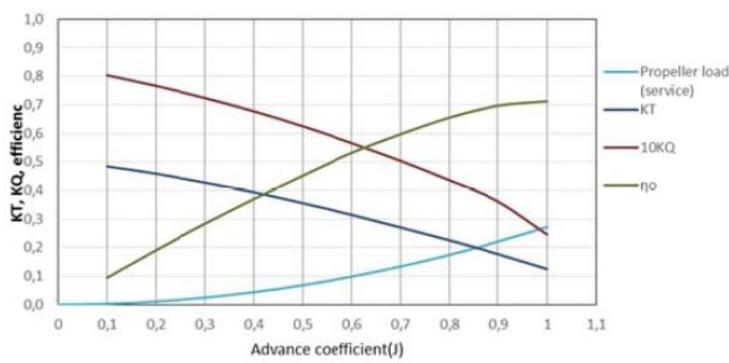
Vs (knot)	J	KT	10KQ	ηo	n (rps)	N (rpm)	Q (kNm)	DHP (kW)	SHP (kW)	BHP (kW)
19,5	0,606	0,265	0,473	0,55	1,463	87,8	3043,9	27970,92	28541,76	30631

## 2. MEGI dengan twin screw propeller

Dengan cara yang sama dengan di atas, proses *engine propeller matching* dapat dilakukan dengan hasil seperti di bawah ini:

Tabel 3. Pemilihan propeller

Type	P/Do	1/Jo	δo	Do(ft)	Db(ft)	D <sub>max</sub> (ft)	D <sub>b</sub> < D <sub>max</sub>	Db(m)
B5-45	1,174	1,1000	111,39	23,12	22,66	28,28	Accept	6,91
B5-60	1,130	1,1300	114,43	23,75	23,28	28,28	Accept	7,09
B5-75	1,136	1,1250	113,92	23,65	23,17	28,28	Accept	7,06
B5-90	1,163	1,1150	112,91	23,44	22,97	28,28	Accept	7,00
B5-105	1,150	1,0900	110,38	22,91	22,45	28,28	Accept	6,84



Gambar 6. Kurva beban propeller diplotkan pada kurva KT-Kq-J dari propeller yang dipilih

Tabel 4 merupakan daya yang dibutuhkan oleh mesin untuk mengoperasikan kapal LNG saat menggunakan propeller ganda yang terdapat pada mesin ME-GI. Satu mesin membutuhkan daya untuk propulsi sebesar 13,458 kW untuk mengoperasikan kapal pada kecepatan 19.5 knot. Total daya yang dibutuhkan untuk propeller ganda adalah 2 X 13,458 kW.

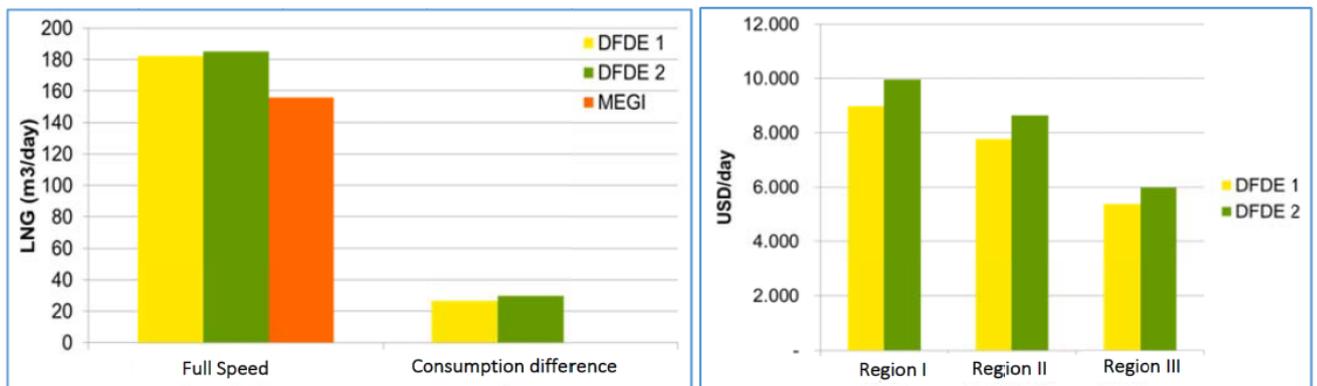
Tabel 4. Kebutuhan daya dari ME-GI pada kondisi kecepatan 19.5 Knot

Vs (knot)	J	KT	10KQ	ηo	n (rps)	N (rpm)G	Q (kNm)	DHP <sub>v</sub> (kW)	SHP (kW)	BHP (kW)
19,5	0,85	0,2	0,4	0,68	1,418	85,06	1481	13189	13458	13458

### 4.3 Perbandingan konsumsi bahan bakar

Pada studi ini, data operasi dari kapal LNG milik Tangguh LNG digunakan sebagai dasar perhitungan. Pemilihan motor penggerak utama pada kapal LNG baru yang rencananya akan dibangun menjadi penting sebagai dasar penentuan mesin akan yang dipilih. Paper ini telah melakukan kajian secara ekonomi konsumsi bahan bakar sebagai perbandingan beberapa jenis motor penggerak untuk kapal LNG, diantaranya turbin uap dan *dual fuel engine* (DFDE, ME-GI dan X-DF). Khusus untuk jenis mesin X-DF tidak dilakukan analisa perbandingan dikarenakan saat ini jenis mesin ini masih dalam tahap uji kelayakan untuk penggunaan di kapal.

Dari hasil analisa yang telah dilakukan, turbin uap memiliki konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *dual fuel engine* tipe DFDE. Kedua jenis motor penggerak ini dapat dilakukan analisa perbandingan dikarenakan tersedianya data nyata dari operasional kapal yang dimiliki oleh Tangguh LNG. Sedangkan perbandingan antara DFDE dan ME-GI dapat dilakukan dengan perhitungan kebutuhan daya dan konsumsi bahan bakar dikarenakan belum ada data operasional nyata yang didapatkan untuk *dual fuel engine* berjenis ME-GI.



Gambar 7. a. Perbedaan konsumsi bahan bakar, b. Profit yang hilang/hari

Perbedaan konsumsi antara DFDE dan MEGI dapat dilihat dari hasil perhitungan dalam pembahasan sebelumnya. Untuk memberikan interpretasi yang jelas dalam hal ini, Gambar 7 menjelaskan mengenai perbedaan konsumsi pada dua jenis mesin tersebut. Gambar ini menyatakan bahwa kapal berpengerak ME-GI memiliki konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit. Perbedaan konsumsi bahan bakar kurang lebih sebesar 25 m<sup>3</sup>/hari jika dibandingkan dengan DFDE. Ini berkorelasi dengan aspek ekonomi. Berkurangnya profit juga dapat terjadi karena perbedaan konsumsi bahan bakar. Hal ini dapat dihindari apabila ME-GI dipakai untuk mengoperasikan kapal LNG yang akan dibangun nanti. Berkurangnya profit yang dapat dihindari dapat diterangkan oleh Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan jumlah profit yang hilang per hari yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar motor penggerak dalam pengoperasian kapal LNG untuk tujuan distribusi LNG ke berbagai region yang memiliki nilai penjualan LNG berbesa-beda.

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari studi ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. BOG yang dihasilkan secara natural dalam pengoperasian kapal LNG, dapat memenuhi kebutuhan bahan bakar motor penggerak utama pada hampir setiap operasional mode kapal. Penambahan LNG sebagai bahan bakar (*forcing*) diperlukan khususnya pada saat kapal dioperasikan dengan mode *full speed*.
2. Berdasarkan perhitungan konsumsi bahan bakar dan efisiensi, turbin uap memberikan keuntungan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *dual fuel diesel engine*.
3. Dua tipe mesin berbahan bakar ganda telah dipertimbangkan yaitu DFDE dan ME-GI engine. ME-GI menghemat lebih banyak bahan bakar daripada DFDE.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. R. CUSDIN, *The development of Liquefied Natural Gas Carriers – a marine engineering success*. London: The Institute of Marine Engineers, 1998.
- [2] GILMORE, R., HATZIGRIGORIS, S., MAVRAKIS, S., SPERTOS, A., VORDONIS, A., “LNG carrier alternative propulsion systems,” *SNAME-Greek*, 2005.
- [3] FERNÁNDEZ, I. A., GÓMEZ, M. R., GÓMEZ, J. R., A. INSUA, A. A.B., “Review of propulsion systems on LNG carriers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1395–1411, 2017.