

# Rancang Bangun Motor Listrik *Submersible* pada Aplikasi *Bow Thruster* Kapal

Cuk Supriyadi Ali Nandar<sup>1</sup>, Asep Andi Suryandi<sup>2</sup>, Dewi Rianti Mandasari<sup>3</sup>, Katri Yulianto<sup>4</sup>, Sumardi<sup>5</sup>

**Abstract**—This paper proposes the design of submersible electric motors for vessel's bow thruster. The advantages of the proposed design in comparison with a conventional electric motor are smaller diameter, without gear driven, better efficiency, low noise level, and minimizing oil leakage or more environmentally friendly. The proposed design has been manufactured and will be applied to navigation vessels. Simulation and factory acceptance test (FAT) results show that the proposed design has fulfilled the naval architect requirements and give better performance in comparison with conventional electric motor designed by NEMA standard's frame.

**Intisari**—Makalah ini mengajukan rancang bangun motor listrik *submersible* pada aplikasi *bow thruster* kapal. Keunggulan desain motor listrik *submersible* dibandingkan teknologi motor listrik konvensional adalah diameter yang lebih kecil, tidak memerlukan *gear driven*, tingkat kebisingan yang rendah, efisiensi lebih tinggi, dan meminimalkan kebocoran oli pelumas sehingga lebih ramah lingkungan. Desain yang diajukan telah melalui proses manufaktur dan akan digunakan pada kapal navigasi. Hasil simulasi dan uji beban di industri manufaktur menunjukkan bahwa desain yang diajukan sudah memenuhi persyaratan *naval architect* dan mempunyai kinerja lebih bagus dibanding dengan motor yang didesain dengan *frame standard NEMA*.

**Kata Kunci**— Penggerak baling-baling, kapal, tol laut, *bow thruster*, motor listrik *submersible*.

## I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan terluas di dunia, yang terdiri atas lebih dari 13 ribu pulau dan 70% wilayahnya berupa lautan dengan garis pantai terpanjang di dunia, 81.000 km, serta terletak di antara dua samudera dengan jalur pelayaran tersibuk di dunia, melalui selat Malaka dan selat Singapura – Batam. Hal tersebut menempatkan Indonesia sebagai negara maritim terbesar dan terpenting di dunia [1]. Visi dan misi pemerintah saat ini, yaitu mewujudkan sektor kelautan dan perikanan Indonesia yang mandiri, maju, kuat, dan berbasis kepentingan nasional, serta membangun tol laut/poros maritim merupakan aktualisasi terhadap kemandirian dan kedaulatan terhadap pengelolaan, pemanfaatan, dan menjaga keutuhan batas teritorial serta kelestarian lingkungan wilayah lautan NKRI [2].

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Perekayasa, Pusat Teknologi Industri Permesinan (PTIP) – BPPT, Gedung Teknologi 2 Kawasan PUSPIPTEK Serpong 15314 (telp: 021-75875944; fax: 021-75875938; e-mail: cuk.supriyadi@bppt.go.id)

<sup>5</sup>Direktur, PT RiSEA Propulsion Indonesia, Excutive Industrial Park C1 No. 2-3, Batam 294444 (telp: 0778-480 2280; fax: 0778-480 2281; e-mail: sumardi@riseapropulsion.com)

Untuk mewujudkan cita-cita tersebut, kemandirian teknologi sarana perkapalan untuk transportasi sipil, perikanan, maupun yang lain perlu diwujudkan. Dalam hal ini, Kementerian Perhubungan Indonesia membangun kapal navigasi kelas satu, kapal kontainer 100 TEUS untuk memperlancar arus barang dan transportasi logistik domestik. Hingga saat ini, kebutuhan propulsi, misalnya *bow thruster*, masih diimpor dari luar negeri (Eropa, Amerika, maupun Jepang). PT. RiSEA Propulsion Indonesia bekerja sama dengan Pusat Teknologi Industri Permesinan (PTIP) – BPPT sedang mengembangkan motor induksi propulsi *bow thruster* dalam negeri untuk mengurangi ketergantungan dari luar negeri.

Karena kesederhanaan, ketahanan, dan biaya yang rendah, mesin induksi banyak digunakan sebagai motor penggerak baling-baling kapal. Umumnya, baling-baling kapal dengan penggerak motor induksi berfungsi sebagai pendorong bantu yang digunakan untuk manuver kecepatan rendah, transversal, dok, dan stasiun. Sistem propulsi tambahan biasanya ditempatkan di haluan kapal (*bow thruster*). Untuk kapal besar yang memerlukan manuver tinggi, digunakan sepasang motor *bow thruster*[3].

Pengembangan desain motor sebagai penggerak kapal sudah mulai dilakukan. Pengoptimalan bentuk motor induksi sangkar tupai menggunakan analisis sensitivitas parameter geometri stator dan rotor telah dilakukan. Metode ini kemudian diimplementasikan dalam desain motor NEMA desain B, C dan D [3].

Optimasi desain motor bawah air berdasarkan analisis algoritme optimasi Alopex dan Chaotic telah dilakukan [4]. Metode optimasi hibrida ini digunakan untuk menyelesaikan desain optimasi secara nonlinear. Optimasi ini diterapkan pada kerapatan fluks celah udara motor bawah air.

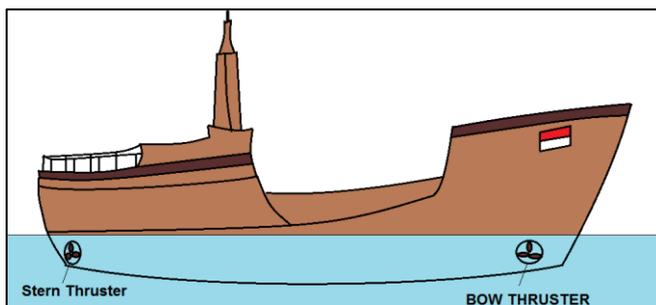
Geometri motor berdasarkan desain elektromagnetik motor induksi tiga fasa juga telah diusulkan [5]. Prosedur ini didasarkan pada analisis fluks motor. Dimensi geometris dari mesin laminasi magnetik telah ditentukan terlebih dahulu, kemudian dilakukan modifikasi bentuk *slot* stator dan rotor.

Penelitian tersebut banyak diaplikasikan pada *bow thruster* dengan sistem konvensional, yaitu *standard gear driven*. Pada aplikasi ini, motor diletakkan di dalam kapal dan digunakan *reduction gear* untuk menggerakkan baling-baling, sehingga terdapat rugi-rugi pada roda gigi dan menambah kebisingan propulsi. Selain itu, ada kemungkinan kebocoran pelumas pada roda gigi yang dapat mencemari lingkungan. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, makalah ini mengusulkan pemanfaatan motor listrik *submersible* pada *bow thruster*. Desain motor listrik *submersible* berbeda dengan motor listrik konvensional. Selain dimensi harus menyesuaikan desain kapal, teknologi motor listrik *submersible* juga menawarkan

teknologi dengan desain yang kompak, efisiensi lebih tinggi, mengurangi kebisingan, dan perawatan yang mudah. Selain itu, motor listrik *submersible* lebih ramah lingkungan karena dapat dikopel dengan baling-baling tanpa memerlukan *gearbox*. Adanya *gearbox* dapat meningkatkan kemungkinan kebocoran oli yang dapat mencemari lingkungan. Motor listrik juga didesain dengan pendinginan air laut secara langsung sehingga tidak memerlukan sistem pendinginan udara lagi. Desain motor akan diaplikasikan untuk kapal navigasi kelas satu Kementerian Perhubungan Indonesia.

## II. PERANCANGAN SISTEM

*Bow thruster* merupakan penggerak kapal untuk tujuan manuver. *Bow thruster* berada di posisi depan kapal, seperti ditunjukkan pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Posisi *bow thruster* pada kapal.

Pada umumnya, *bow thruster* yang digunakan adalah *bow thruster* standar dengan menggunakan motor *gear driven* seperti pada Gbr. 2(a), sedangkan rancang bangun pada makalah ini adalah motor *e-pod bow thrusters* yang langsung terkopel dengan propeler seperti terlihat pada Gbr. 2(b).



Gbr. 2(a) Motor *gear driven*, (b) Motor *e-pod bow thruster*.

Secara khusus, jari-jari dari *body asymmetric e-Pod Bow thruster* perlu diminimalkan. Hal ini tergantung pada desain elektrodinamika motor propulsi, yaitu kecepatan dan panjang motor. Selain itu, kecepatan dan daya motor memengaruhi efisiensi baling-baling [6]. Dalam melaksanakan perancangan sistem motor penggerak *bow thruster*, diperlukan langkah-langkah perancangan yang akan dijelaskan sebagai berikut.

### A. Kapasitas Motor Listrik

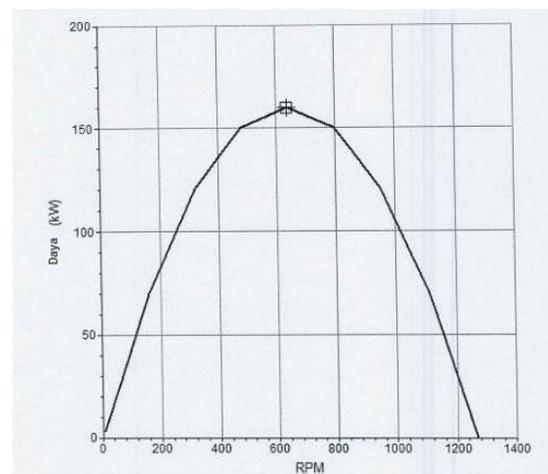
Penentuan kapasitas motor yang diperlukan untuk mendorong kapal ditentukan oleh arsitek kapal. Penentuan kapasitas dilakukan berdasarkan berat kapal dan dimensinya. Dari perhitungan arsitek kapal, kapasitas motor listrik yang diperlukan adalah 160 kW.

Arsitek kapal juga perlu mengeluarkan dimensi *bow thruster* untuk mencapai kinerja yang terbaik, yaitu diameter tidak lebih dari 510 mm dan panjang tidak lebih dari 600 mm.

Pada proses desain motor listrik ini, dimensi harus diperhatikan. Diameter yang terlalu besar dapat menyebabkan baling-baling terlalu mendekati permukaan air sehingga daya dorong berkurang, sedangkan dimensi yang terlalu panjang menyebabkan baling-baling menonjol keluar yang dapat memengaruhi kinerja kapal secara keseluruhan. Diameter ini juga sangat penting untuk perancang baling-baling dalam menentukan diameter baling-baling sebelum melakukan optimasi bentuk baling-baling.

### B. Putaran Kerja Motor Listrik

Untuk melakukan rancang bangun motor listrik, grafik performa baling-baling sangat diperlukan. Grafik baling-baling merupakan hasil dari kajian dan perhitungan perancang baling-baling. Grafik baling-baling yang dihasilkan dari perancang baling-baling ditunjukkan pada Gbr. 3.



Gbr. 3 Grafik kinerja daya baling-baling vs rpm.

Gbr. 3 menunjukkan bahwa kinerja daya baling-baling yang optimal ada pada putaran 635 rpm. Putaran ini menjadi acuan perancang motor listrik dalam menentukan spesifikasi motor listrik dan proses rancang bangunnya.

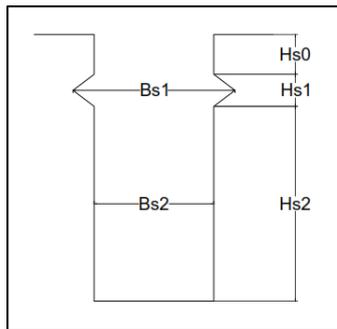
### C. Penentuan Spesifikasi Motor Listrik

Pada prinsipnya, spesifikasi rancang bangun motor induksi untuk kecepatan konstan dan variabel masing-masing berbeda satu sama lain. Motor yang dirancang untuk suplai tegangan ( $V$ ) dan frekuensi ( $f$ ) konstan, pada beberapa titik waktu, dipasang dari variabel  $V$  dan  $f$  untuk kecepatan variabel. Dengan demikian, perlu ditentukan spesifikasi untuk suplai  $V$  dan  $f$  konstan atau variabel. Prinsip desain pada umumnya dapat digunakan untuk kecepatan konstan dan variabel. Namun, pada kecepatan variabel terdapat batasan khusus dalam rancang bangun, misalnya pada aspek geometris (geometri *slot rotor*), sehingga konfigurasi akhir menjadi berbeda [5].

Berdasarkan data kapasitas, dimensi dari arsitek kapal, dan putaran motor dari perancang baling-baling, diperoleh spesifikasi teknis motor seperti yang disajikan pada Tabel I.

TABEL I  
SPESIFIKASI TEKNIS MOTOR LISTRIK

Parameter	Nilai	Satuan
Daya (P)	160	kW
Kecepatan	635	Rpm
Tegangan	400	Volt
Arus	357	Amp
Jumlah Fasa	3	
Frekuensi	43,5	Hz
Kelas Isolasi	H	
Suhu Lingkungan	25	°C



Gbr. 4 Bentuk slot stator.

Setelah spesifikasi motor listrik sudah ditentukan, langkah selanjutnya adalah desain rinci motor listrik.

D. Rancang Bangun Motor Listrik

Desain motor dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama. Pertama adalah menggunakan pendekatan matematis yang umum digunakan. Pendekatan ini memungkinkan fleksibilitas di dalam perancangan dan umum digunakan sebagai algoritme pada perangkat lunak komersial. Pendekatan kedua adalah berdasarkan pengalaman perancang. Pendekatan ini memiliki fleksibilitas yang sangat rendah karena desain motor yang baru tidak sesuai dengan desain motor sebelumnya. Dalam 20 tahun terakhir, metode elemen hingga (finite element method/FEM) merupakan metode yang sering digunakan dalam perancangan motor listrik [7].

Dalam mendesain motor listrik, ada beberapa proses dan prosedur perhitungan yang dilakukan. Berikut ini merupakan langkah-langkah dalam perhitungan motor induksi [8]--[10].

1) *Kalkulasi Stator*: Beberapa kalkulasi dalam penentuan dimensi motor adalah sebagai berikut.

- Diameter bore stator:

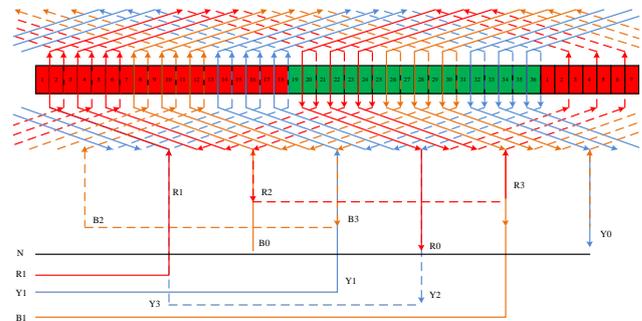
$$D = \frac{D_0 - 0,647}{1,175 + \frac{1,03}{p}} \tag{1}$$

dengan:

- $D$  : Diameter stator
- $D_0$  : Diameter luar Stator
- $P$  : Jumlah kutub

TABEL II  
UKURAN SLOT STATOR

Nama	Nilai	Satuan
Hs0	0	mm
Hs1	3,44	mm
Bs1	14,07	mm
Hs2	38,05	mm
Bs2	10,59	mm



Gbr. 5 Susunan belitan pada stator.

- Bentuk *slot* stator:  
Dimensi slot stator sangat penting untuk menentukan kinerja dan kemudahan dalam proses manufaktur. Bentuk slot stator yang dipilih dalam studi ini ditunjukkan pada Gbr. 4. Dari perhitungan diperoleh dimensi slot stator seperti pada Tabel II.

- Belitan stator:  
Mekanisme penyusunan belitan stator diperlihatkan pada Gbr. 5.

2) *Kalkulasi Rotor*: Kalkulasi rotor meliputi perhitungan gap udara, diameter rotor, jumlah slot, dan dimensi bentuk rotor.

- Celah udara:

$$\delta = (0,0016 \times D) + (0,001 \times \ell_a) \tag{2}$$

dengan:

- $\delta$  : Celah udara
- $D$  : Diameter stator
- $\ell_a$  : Panjang stator

- Diameter rotor

$$D_r = D - (2 \times \delta) \tag{3}$$

dengan:

- $D_r$  : Diameter rotor

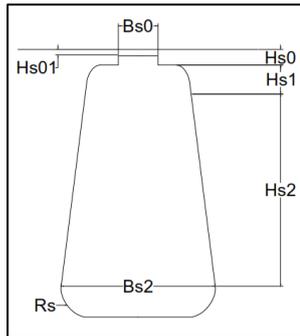
- Bentuk *slot* rotor

Bentuk slot rotor yang dipilih ditunjukkan pada Gbr. 6. Dari perhitungan diperoleh dimensi slot rotor seperti pada Tabel III.

3) *Kalkulasi Kinerja*: Kinerja dapat dihitung melalui perhitungan nilai maksimum kerapatan fluks semu ( $B_{stm}$ ) pada gigi stator menggunakan (4).

TABEL III  
DIMENSI *SLOT* ROTOR

Nama	Nilai	Satuan
Hs0	2,052	mm
Hs01	1,308	mm
Hs1	0,744	mm
Hs2	24,869	mm
Bs0	3	mm
Bs1	6,604	mm
Bs2	6,604	mm
Rs	0,381	mm



Gbr. 6 Bentuk slot rotor.

$$B_{stm} = \frac{\frac{\pi}{2} \Phi_m}{\frac{S_1}{p} t_{s1} \ell_a SF} = \frac{\pi p \Phi_m}{2 S_1 t_{s1} \ell_a SF} \quad (4)$$

dengan:

- $B_{stm}$  : Nilai maksimum kerapatan fluks semu
- $\pi$  :  $pi$  (3,14)
- $\Phi_m$  : Nilai fluks maksimum
- $p$  : Jumlah kutub
- $S_1$  : Jumlah *slot* stator
- $t_{s1}$  : Lebar gigi stator
- $\ell_a$  : Panjang stator
- $SF$  : *Stacking factor*

Untuk desain yang baik, nilai maksimum kerapatan fluks semu adalah  $1,4 \leq B_{stm} \leq 1,9$  T.

Perhitungan nilai maksimum kerapatan fluks pada inti stator ( $B_{scm}$ ) dilakukan menggunakan (5).

$$B_{scm} = \frac{\Phi_m / 2}{\left(\frac{D_0 - D}{2} - d_{s1}\right) \ell_a SF} \quad (5)$$

dengan:

- $B_{scm}$  : Nilai maksimum kerapatan fluks pada inti stator
- $\Phi_m$  : Nilai fluks maksimum
- $D_0$  : Diameter luar stator
- $D$  : Diameter stator
- $d_{s1}$  : Kedalaman *slot* stator

$\ell_a$  : Panjang stator

$SF$  : *Stacking factor*

Nilai maksimum kerapatan fluks pada inti stator untuk memenuhi kriteria desain yang baik adalah  $0,8 \leq B_{scm} \leq 1,5$  T.

Nilai maksimum kerapatan fluks semu pada gigi rotor ( $B_{rtm}$ ) dapat dihitung dengan (6).

$$B_{rtm} = \frac{\pi \times p \times \Phi_m}{2 \times S_2 \times t_{r2} \times \ell_a \times SF} \quad (6)$$

dengan:

$B_{rtm}$  : Nilai maksimum kerapatan fluks semu pada gigi rotor

$\pi$  :  $pi$  (3,14)

$\Phi_m$  : Nilai fluks maksimum

$p$  : Jumlah kutub

$S_2$  : Jumlah *slot* rotor

$t_{r2}$  : Lebar gigi rotor

$\ell_a$  : Panjang stator

$SF$  : *Stacking factor*

Nilai maksimum kerapatan fluks pada gigi rotor untuk memenuhi kriteria desain yang baik adalah  $1,4 \leq B_{rtm} \leq 1,9$  T.

Nilai maksimum kerapatan fluks pada inti rotor ( $B_{rcm}$ ) adalah sebagai berikut.

$$B_{rcm} = \frac{\Phi_m}{(D_r - D_{sn} - 2d_c - 2d_{r1}) \times \ell_a \times SF} \quad (7)$$

dengan:

$B_{rcm}$  : Nilai maksimum kerapatan fluks pada inti rotor

$\Phi_m$  : Nilai fluks maksimum

$D_r$  : Diameter rotor

$D_{sn}$  : Diameter poros

$d_c$  : Diameter lubang udara pada area inti

$d_{r1}$  : Kedalaman *slot* rotor

$\ell_a$  : Panjang stator

$SF$  : *Stacking factor*

Nilai maksimum kerapatan fluks pada inti rotor untuk memenuhi kriteria desain yang baik adalah  $B_{rcm} \leq 1,55$  T.

Desain elektromagnetik motor, khususnya rotor dapat dioptimalkan untuk operasi pada *slip* rendah. Perbaikan lebih lanjut terhadap kinerja dapat diperoleh dengan pemilihan jumlah kutub dan frekuensi motor yang tepat [11].

#### E. Perhitungan Diameter Minimum Poros Motor Listrik

Kalkulasi poros baling-baling dilakukan menggunakan kode dan standar [12]. Kalkulasi memberikan nilai diameter minimum pada material yang digunakan sebagai berikut.

$$D = 100 \cdot K \cdot \sqrt[3]{\frac{H}{R} \cdot \left(\frac{C_1}{U + C_2}\right)} \quad (8)$$

dengan:

$D$  : Diameter

$K$  : Faktor pengali

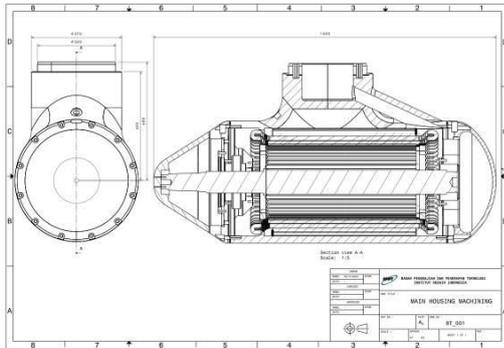
$U$  : Kekuatan material

$C_1, C_2$  : Konstanta sesuai material pada *ABS Code*

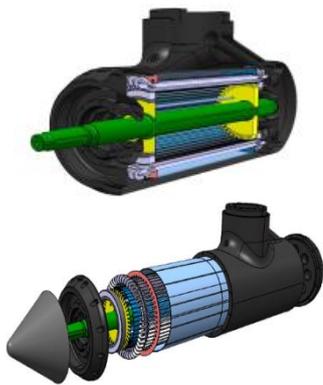
Dalam studi ini, dipilih  $K = 1,14$  dengan asumsi nilai kondisi terburuk,  $C_1 = 560$  dan  $C_2 = 160$  sesuai *ABS Code*. Dengan menggunakan (8), diperoleh diameter minimal poros adalah 53,1 mm.

**F. Prototyping & Manufacturing**

Dari hasil perhitungan kemudian dilakukan pembuatan gambar 2D dan 3D untuk dilakukan proses manufaktur. Gambar 2D dan 3D ditunjukkan pada Gbr. 7 dan Gbr. 8 secara berurutan.



Gbr. 7 Gambar desain 2D.



Gbr. 8 Gambar desain 3D.



Gbr. 9 Motor hasil manufaktur.

Mengacu pada gambar manufaktur, industri sudah dapat memproduksi motor sesuai desain. Hasil manufaktur motor listrik *submersible* ditunjukkan pada Gbr. 9.

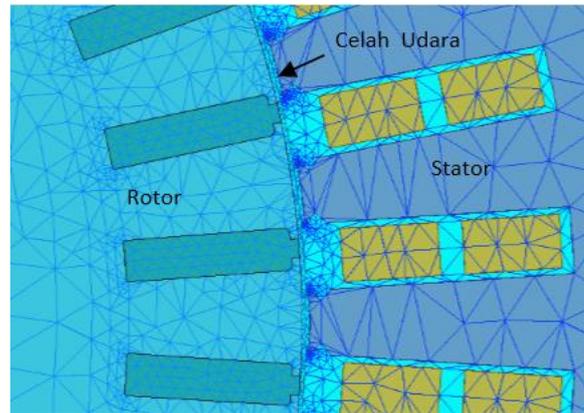
**III. HASIL DAN ANALISIS**

**A. Analisis Elektromagnetik**

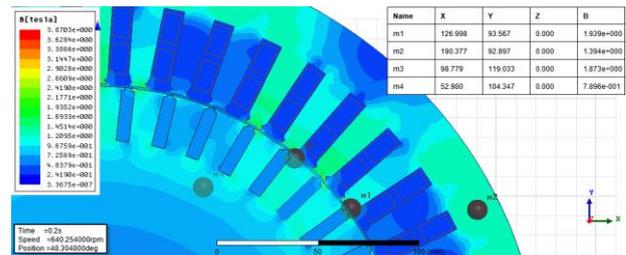
Analisis elektromagnetik dilakukan untuk mengetahui bahwa desain motor telah sesuai kriteria desain yang baik dari sisi kerapatan fluks di gigi dan inti stator serta rotor. Gbr. 10

memperlihatkan hasil *meshing* motor, dengan total *mesh* adalah 39.456. Pada Gbr. 10 terlihat kerapatan *mesh* pada celah udara (*air gap*) lebih tinggi dibanding bagian motor lainnya.

Gbr. 11 memperlihatkan kerapatan fluks motor, dengan kerapatan fluks di gigi stator sebesar 1,933 T (m1) dan di inti stator 1,394 T (m2). Sementara itu, kerapatan fluks di gigi rotor adalah 1,873 T (m3) dan di inti rotor 0,789 T (m4). Hal tersebut memperlihatkan bahwa kerapatan fluks pada inti besi, baik di stator maupun rotor semakin membesar di bagian ujung. Kerapatan fluks motor dari hasil simulasi menunjukkan bahwa motor telah mencapai desain yang baik dari sisi kerapatan fluks.



Gbr. 10 Meshing pada celah udara (*air gap*).



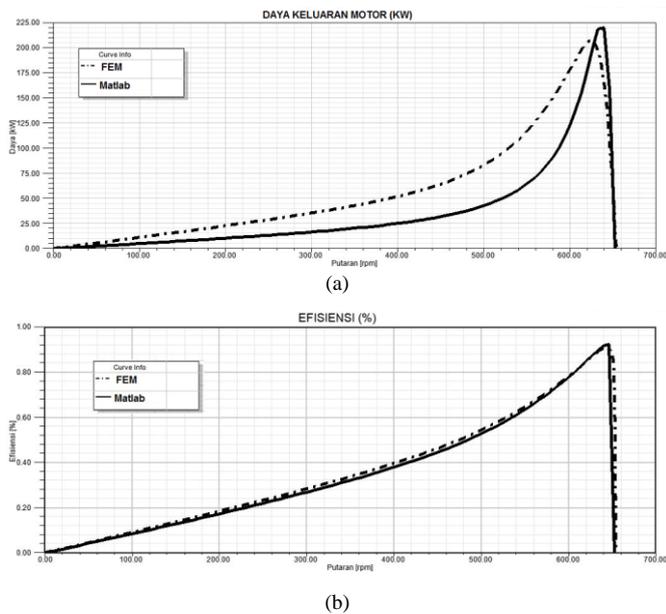
Gbr. 11 Kerapatan fluks pada motor: stator (m1 dan m2) dan rotor (m3 dan m4).

**B. Kinerja Motor Listrik**

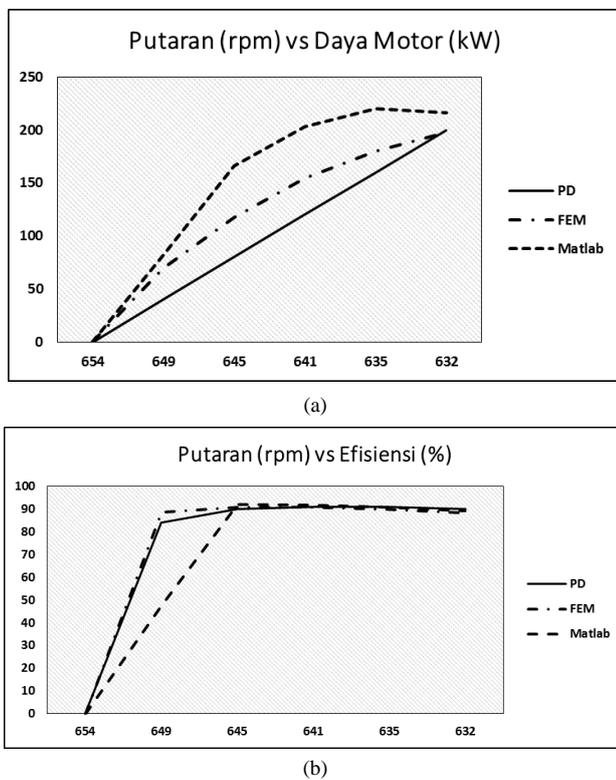
Dari perhitungan yang dilakukan pada bagian II, dilakukan analisis kinerja motor dengan menggunakan simulasi FEM dan MATLAB. Perbandingan kinerja motor listrik dengan menggunakan kedua metode tersebut diperlihatkan pada Gbr. 12.

Hasil analisis memperlihatkan motor dapat menghasilkan torsi yang lebih besar dari permintaan arsitek kapal. Jadi, untuk mencapai beban sebesar 160 kW, motor listrik bekerja 71% dari daya yang dapat dihasilkan. Hal ini diperhitungkan oleh perancang motor listrik untuk memperpanjang umur pakai motor tersebut.

Ada beberapa faktor yang mengakibatkan perbedaan hasil tersebut, antara lain pendekatan yang berbeda dalam menganalisis motor, yaitu pada pendekatan awal digunakan simulasi FEM sementara pada MATLAB digunakan pendekatan analitik, serta adanya perbedaan pendeskripsian parameter antara kedua analisis tersebut.

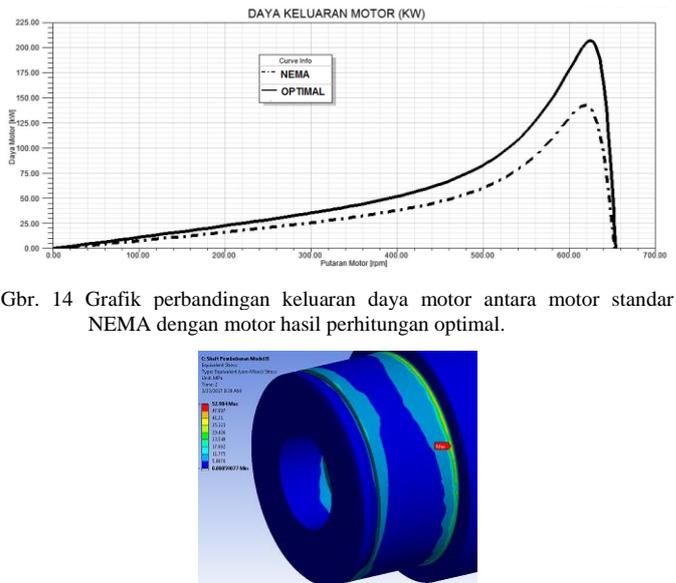


Gbr. 12 Hasil analisis FEM dan MATLAB. (a) Daya keluaran, (b) Efisiensi.

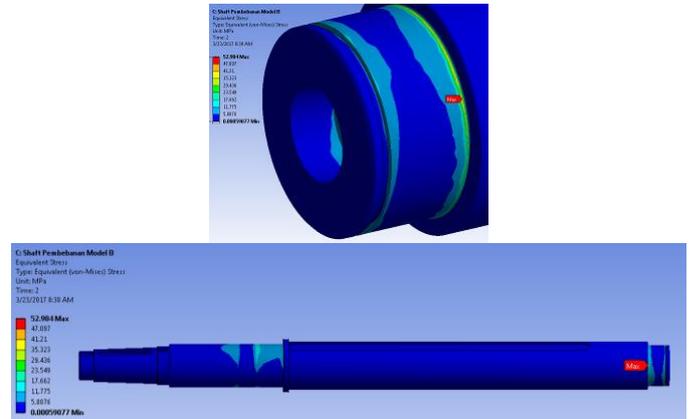


Gbr. 13 Grafik perbandingan kinerja motor antara PD, FEM, dan MATLAB.

Gbr. 13 memperlihatkan perbandingan kinerja motor antara hasil *performance data* (PD) pengujian motor, FEM, dan MATLAB. Hasil perbandingan tersebut memperlihatkan bahwa kinerja motor dari PD dan analisis (FEM dan MATLAB) masih berbeda. Perbedaan tersebut disebabkan oleh masih adanya perbedaan geometri aktual dari PT. Risa Propulsion Indonesia dengan perhitungan berdasarkan literatur yang diperoleh.



Gbr. 14 Grafik perbandingan keluaran daya motor antara motor standar NEMA dengan motor hasil perhitungan optimal.



Gbr. 15 Simulasi kekuatan struktur poros saat tidak berputar.

TABEL IV  
SIMULASI KEKUATAN POROS MOTOR LISTRIK

	Metode Poros Tidak Berputar	Metode Poros Berputar
Tegangan Ekuivalen	52,984 MPa.	110,66 Mpa
Faktor Keamanan	8,49	4,06
Deformasi Total	0,02380 mm	0,024402 mm

C. Perbandingan Kinerja Motor Listrik

Pada *NEMA Standard MG-1*, untuk motor kapasitas 160 kW dimensi *frame* yang digunakan sebesar 23,62 inci atau 599,948 mm. Sementara itu, untuk motor listrik *submersible* ini dimensi *frame* menyesuaikan dimensi baling-baling dan *tunnel*. Dari perhitungan, diperoleh diameter *frame* yang optimal sebesar 505 mm. Gbr. 12 memperlihatkan kinerja motor dengan standar NEMA dan motor listrik hasil perhitungan optimal.

Dari Gbr. 14 dapat diketahui bahwa keluaran daya motor dengan ukuran *frame* standar NEMA lebih rendah dan di bawah daya motor nominal.

D. Perhitungan Kekuatan Poros Motor Listrik

Selain kinerja secara elektrik, studi juga memperhatikan perhitungan kekuatan poros motor listrik. Simulasi dilakukan dengan dua kasus yang berbeda, yaitu saat poros tidak berputar dan saat poros berputar. Salah satu hasil simulasi kekuatan struktur poros ditunjukkan pada Gbr. 15.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan ekuivalen maksimum pada metode poros tidak berputar adalah sebesar 52,984 Mpa, terletak pada bagian sisi dalam tumpuan *roller bearing*. Sedangkan pada daerah *thrust bearing* besarnya tegangan ekuivalen adalah 17,662 MPa sampai 35,323 MPa. Dari hasil simulasi ini diketahui nilai tegangan ekuivalen maksimum masih jauh dari kekuatan *yield* ASTM A815, yaitu sebesar 450 Mpa. Dengan demikian, nilai faktor keamanannya adalah sebesar 8,4922. Secara ringkas, hasil simulasi poros ditunjukkan pada Tabel IV.

Dengan besar faktor keamanan di atas empat, terbukti bahwa poros aman bekerja pada sistem *bow thruster* yang akan dipakai.

#### IV. KESIMPULAN

Makalah ini mengusulkan rancang bangun motor listrik *submersible* yang digunakan untuk penggerak kapal. Motor jenis ini berbeda dengan motor listrik konvensional. Hasil rancang bangun telah digunakan oleh industri manufaktur motor listrik dalam negeri untuk kapal navigasi Kementerian Perhubungan Indonesia. Untuk membuktikan kinerja, motor listrik telah diuji berbeban pada proses *Factory Acceptance Test* (FAT). Dari hasil rancang bangun dan simulasi motor listrik, diperoleh hasil bahwa motor tersebut memiliki kinerja yang baik karena menghasilkan daya lebih besar dari daya yang diinginkan, sehingga dapat memperpanjang umur pakai motor listrik. Poros putar motor listrik memiliki faktor keamanan di atas empat, sehingga dapat dikatakan motor listrik ini aman untuk digunakan. Rancang bangun ini menghasilkan desain yang lebih optimal dibandingkan dengan

standar NEMA, yaitu dengan ukuran *frame* yang lebih kecil diperoleh keluaran daya yang lebih besar.

#### REFERENSI

- [1] Peraturan Pemerintah RI Nomor 38 Tahun 2002.
- [2] "Indonesia Sebagai Poros Maritim Dunia", [Online], <http://www.presidentri.go.id/berita-aktual/indonesia-sebagai-poros-maritim-dunia.html>.
- [3] Nikolaou, K. I., Beniakar, M. E., Kladas, A. G., "Design Considerations in Induction Motors for Ship Thruster Propulsion". *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 2-5 Sept. 2014.
- [4] Changzhi, S., Zhifei C., Hongyan S., "Optimal Design of Thruster Motor for Underwater Robot", *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. China, 2004.
- [5] Boglietti, A. Cavagnino, A., Lazzari, A., "Geometrical Approach to Induction Motor Design", *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Nov. 5-8, Taipei, Taiwan, 2007.
- [6] Carlton, John. *Marine Propellers and Propulsion*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [7] Boglietti, A., "Geometrical Approach to Induction Motor Design", *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Nov. 5-8, Taipei, Taiwan, 2007.
- [8] I.Boldea, S.A.Nasar, *The Induction Machines Design Handbook second edition*, Romania: CRC Press, 2010.
- [9] Cathey, Jimmie J. *Electric machines: Analysis and Design Applying Matlab*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [10] Murthy, K. M. Vishnu. *Computer-Aided Design of Electrical Machines*. Hyderabad: BS Publications, 2008.
- [11] Lewis, Clive, "The Advanced Induction Motor", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 21-25 July 2002.
- [12] "ABS Rules for Building and Classing", *Steel Vessel 2008, Part 4, Vessel Systems and Machinery*, American Bureau of Shipping, 2015.