

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan dari 10.22146/jnteti.v13i2.10131

Propulsi Kapal Listrik dengan Motor BLDC IPM: Analisis Kinerja dan Efisiensi

Dewi Rianti Mandasari^{1,2}, Budi Sudiarto¹, Lia Amelia², Cuk Supriyadi Ali Nandar³

¹ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

² Pusat Penelitian Teknologi Industri Proses dan Manufaktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional Republik Indonesia, Serpong, Banten, 15314, Indonesia

³ Pusat Penelitian Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional Republik Indonesia, Serpong, Banten, 15314, Indonesia

[Diserahkan: 3 November 2023, Direvisi: 5 Januari 2024, Diterima: 1 Maret 2024]

Penulis Korespondensi: Dewi Rianti Mandasari (email: dewi031@brin.go.id)

INTISARI — Polusi udara, terutama keberadaan partikel PM2.5, masih menjadi masalah kesehatan global. Meskipun Indonesia memiliki tingkat PM2.5 yang lebih rendah dibandingkan dengan rata-rata global, emisi kendaraan masih menjadi penyumbang polusi udara yang signifikan. Dengan pertimbangan lingkungan dan kesehatan, penggunaan motor listrik ramah lingkungan, terutama motor dengan *interior permanent magnet brushless direct current* (IPM BLDC), dianggap sebagai solusi yang menjanjikan untuk sistem penggerak kapal yang lebih bersih dan efisien, yang akan memberikan manfaat bagi lingkungan serta mata pencaharian nelayan. Penelitian ini secara menyeluruh mengevaluasi efisiensi dan kinerja motor IPM BLDC dalam penggerak kapal, dengan menggunakan analisis elemen hingga (*finite element analysis* - FEA) melalui ANSYS Maxwell. Simulasi FEA pada ANSYS Maxwell dirancang untuk berfokus pada variabel desain yang krusial, seperti torsi motor, kecepatan, dan manajemen termal. Hal tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa spesifikasi motor memenuhi kebutuhan operasional kapal listrik dalam aktivitas penangkapan dan pencarian ikan. Pada kecepatan yang diinginkan, yaitu 5.000 rpm, motor mencapai torsi 15 Nm dengan torsi *cogging* hanya sebesar 7% dan mempertahankan efisiensi rata-rata sebesar 89%. Secara signifikan, motor ini beroperasi pada suhu yang aman tanpa memerlukan sistem pendingin tambahan. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa motor dapat berfungsi secara efektif pada kecepatan yang lebih tinggi, khususnya 6.300 rpm, memberikan peluang untuk memperbaiki sistem penggerak kapal melalui peningkatan kecepatan motor.

KATA KUNCI — Ansys Maxwell, Polusi Udara, Motor BLDC, Torsi *Cogging*, Perahu Listrik, FEA, IPM-V.

I. PENDAHULUAN

Polusi udara telah menjadi topik diskusi hangat di seluruh dunia. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (World Health Organization - WHO), parameter PM2.5 adalah parameter polutan udara yang paling berpengaruh terhadap kesehatan manusia, dengan berpedoman pada kualitas udara $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [1]. Menurut laporan State of Global Air untuk tahun 2020, polusi udara telah meningkat setiap tahun. Pada tahun 2019, konsentrasi PM2.5 global mencapai hingga $42,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [2]. Sebaliknya, pada tahun yang sama, Indonesia mencatat konsentrasi sebesar $19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Secara khusus, 19% dari polusi di Indonesia dihasilkan oleh kendaraan bermotor [3], terutama dari emisi gas buang kendaraan berbahan bakar fosil [4]. Berdasarkan data penelitian, terjadi penurunan signifikan dalam produksi dan ketersediaan bahan bakar fosil pada tahun 2020 [5]. Jika dibandingkan dengan tahun 2019, produksi bahan bakar fosil pada tahun 2020 mengalami penurunan tajam, dengan tingkat penurunan sebesar 5%. Hal tersebut memengaruhi semua jenis bahan bakar fosil, terutama minyak bumi, yang mengalami penurunan sebesar 7% akibat turunnya permintaan transportasi selama krisis kesehatan global.

Saat ini, sebagian besar kendaraan masih bergantung pada bahan bakar tak terbarukan sebagai dampak dari penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber tenaga penggerak kendaraan darat, air, dan udara yang sudah berlangsung lama. Contohnya adalah penggunaan mesin diesel pada perahu berbahan bakar diesel. Pemanfaatan bahan bakar mesin diesel memiliki dampak negatif terhadap aspek ekonomi dan kesehatan. Kelangkaan bahan bakar diesel yang sering terjadi dapat memberikan dampak buruk bagi para nelayan. Sementara itu, gas polutan yang dihasilkan oleh mesin diesel dan kebisingan

yang ditimbulkannya dapat menimbulkan bahaya kesehatan bagi nelayan [6]. Oleh karena itu, sangat penting untuk beralih dari mesin diesel berbahan bakar diesel ke sistem propulsi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan tidak membahayakan kesehatan nelayan. Salah satu alternatif tersebut adalah dengan mengadopsi penggunaan motor listrik untuk transportasi air (perahu).

Seiring berjalannya waktu, penerapan teknik peningkatan kinerja guna mengoptimalkan kinerja mesin listrik, yang berperan sebagai perangkat listrik yang sangat berharga, menjadi strategi krusial untuk menjawab tantangan ini [7]. Penerapan penggunaan magnet permanen dalam mesin telah menarik perhatian banyak peneliti dan produsen motor listrik. Mesin magnet permanen dapat dikategorikan ke dalam dua jenis utama, yaitu fluks radial dan fluks aksial [8]. Motor magnet permanen fluks aksial menawarkan keuntungan yang berbeda, berupa kepadatan daya yang tinggi, efisiensi dan respons dinamis yang cepat, dan semua hal tersebut dikemas dalam bentuk yang lebih ringkas dibandingkan dengan fluks radial. Sementara itu, motor magnet permanen fluks radial menawarkan daya dan kepadatan torsi yang luar biasa sekaligus memberikan kemudahan kontrol kecepatan [9]. Terlebih lagi, strukturnya yang relatif sederhana menjadikannya alternatif menarik untuk dikembangkan dan diproduksi secara lokal di Indonesia.

Di antara berbagai varian motor magnet permanen fluks radial, motor dengan *permanent magnet brushless direct current* (PM BLDC) telah muncul sebagai pilihan yang lebih disukai dalam aplikasi otomotif karena tingkat efisiensi yang tinggi serta keandalan yang baik [9]-[11]. Motor PM BLDC juga menghasilkan torsi yang signifikan pada rentang

kecepatan yang luas, menjadikannya sebagai alternatif yang menguntungkan untuk motor dc tradisional dengan sikat dan motor induksi saat digunakan pada kendaraan listrik, terutama dalam transportasi air [12], [13]. Motor dengan *interior permanent magnet brushless direct current* (IPM BLDC) dirancang dengan magnet permanen yang tersemat dalam inti rotor, yang menghasilkan torsi magnet dan *reluctance torque* yang mencapai kepadatan daya yang lebih tinggi daripada desain tradisional [14]-[16]. Selain itu, motor ini menyuguhkan rentang kecepatan operasional yang lebar dengan menerapkan kontrol pelemahan medan. Kurangnya pemahaman di kalangan produsen motor listrik lokal terhadap desain motor listrik yang menggunakan magnet permanen, yang disertai dengan keterbatasan akses terhadap bahan baku (terutama magnet permanen) di pasar Indonesia, menjadi tantangan signifikan bagi produsen dalam negeri dalam mengembangkan motor BLDC.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas motor BLDC untuk transportasi air serta untuk mencapai kinerja yang sesuai dengan spesifikasi perahu, memastikan efisiensi yang optimal, dan mencegah panas berlebih dengan desain yang mudah diproduksi oleh produsen regional di Indonesia. Hasil simulasi kinerja, seperti torsi, torsi *cogging*, arus stator, daya masukan dan keluaran, termasuk efisiensi dan suhu motor dapat menjadi acuan atau pertimbangan yang penting ketika merumuskan sistem kelistrikan atau catu daya perahu. Upaya ini mendukung inisiatif konversi mesin pembakaran internal (MPI) menjadi kendaraan listrik guna mengurangi tingkat polusi di Indonesia.

II. PERSYARATAN DESAIN

Menurut Statistik Perikanan Tangkap Indonesia, kategori dan ukuran kapal penangkap ikan dibedakan berdasarkan dua kategori utama untuk setiap jenis alat tangkap, yaitu perahu atau kapal dengan atau tanpa tenaga motor [17]. Perahu bertenaga motor tempel diklasifikasikan berdasarkan ukurannya, mulai dari kurang dari 5 GT hingga lebih dari 1.000 GT. Penelitian ini difokuskan pada kapal berkapasitas kurang dari 5 GT yang dilengkapi dengan motor tempel yang menghasilkan tenaga kurang dari 15 DK. Spesifikasi motor tempel yang digunakan diuraikan dalam Tabel I [18].

Agar sesuai dengan persyaratan khusus yang sudah ada berkenaan dengan motor tempel yang dipasang pada perahu yang akan dikonversi, pengadopsian motor IPM BLDC sebagai suatu unit pendorong dapat menjadi pilihan yang optimal. Untuk memenuhi persyaratan khusus terkait motor tempel yang akan dipasang pada perahu yang akan dikonversi, penggunaan motor IPM BLDC sebagai unit pendorong dapat menjadi pilihan yang optimal. Motor IPM BLDC memiliki keunggulan dalam hal efisiensi, keandalan, dan rasio daya terhadap berat yang tinggi. Selain itu, integrasi magnet permanen yang terpasang di dalam struktur rotor memberikan motor IPM BLDC kapasitas untuk menghasilkan torsi yang lebih besar pada berbagai rentang kecepatan operasional. Konfigurasi strategis magnet permanen dalam susunan bentuk V mengoptimalkan kekuatan medan magnet dan memungkinkan volume magnet yang lebih besar [19]. Pengaturan ini memungkinkan motor IPM BLDC untuk menghasilkan torsi keluaran yang lebih tinggi, yang secara efektif memenuhi kinerja yang diharapkan dari motor perahu listrik.

Rotor IPM BLDC menghasilkan medan magnet yang berputar pada frekuensi stabil. Pemakaian secara berkelanjutan atau beban yang melebihi kapasitas yang diizinkan dapat

TABEL I
 PARAMETER MOTOR TEMPEL

Parameter	Nilai	Satuan
Daya keluaran maksimal	11 (15)	kW (hp)
Rentang pengoperasian throttle penuh	4.500 – 5.000	rpm
Sistem pendinginan	Air	-
Torsi poros baling-baling pada 2.500 rpm	29,43	Nm
Torsi mesin pada 5.000 rpm	14,57	Nm

meningkatkan suhu di dalam motor [20]. Kenaikan suhu tersebut dapat mengurangi efisiensi kinerja motor dan berpotensi merusak isolasi pada lilitan motor, sehingga meningkatkan risiko panas berlebih.

Pengurangan panas yang dihasilkan akibat beban pada motor dan pemanfaatan kecepatan maksimum memiliki peranan yang sangat signifikan dalam perancangan motor listrik. Beberapa faktor turut berperan dalam memengaruhi pembuangan panas yang tidak efisien pada motor, antara lain suhu operasional yang tinggi, kondisi lingkungan kerja, ruang instalasi, dan tantangan dalam meningkatkan daya serta kepadatan torsi. Upaya untuk mengurangi suhu motor memerlukan desain rumah motor yang kreatif. Penelitian-penelitian yang ada terutama berfokus pada sistem pendingin yang menggunakan media seperti air, udara, cairan, dan minyak. Pendinginan air dan sistem berbasis kipas telah terbukti berdampak positif terhadap pendinginan motor BLDC.

Pendingin berbahan oli memberikan pendinginan inti stator yang sangat baik, sehingga meningkatkan kinerja pada kondisi terukur [20]. Salah satu alternatif yang mungkin dilakukan adalah menambahkan sirip pada rumah motor listrik. Sirip tersebut dapat meningkatkan laju perpindahan panas dan membantu mengurangi suhu pada lilitan ujung [21]. Penelitian ini mengevaluasi daya tahan operasional motor dalam menangkap ikan selama satu jam dan melakukan pencarian selama dua jam. Untuk mengurangi berat sistem pendorong, kapal penangkap ikan dengan tonase kotor di bawah 5 GT menggunakan motor elektrik berdesain kecil. Desain tersebut memerlukan tingkat perlindungan *ingress protection* (IP) sebesar 67 untuk melindunginya dari cipratan air laut di lokasi terbuka. Sebuah motor listrik dengan pendingin udara alami sangat cocok untuk penggerak kapal.

III. DESAIN MOTOR PM BLDC

Perancangan motor PM BLDC dimulai dengan seleksi mesin traksi dan evaluasi kondisi operasional pendorong kapal. Mengingat kebutuhan akan torsi yang tinggi pada kecepatan tinggi serta perlunya sistem pendinginan alami, motor dengan kepadatan torsi yang tinggi menjadi suatu keharusan.

Analisis literatur yang mendalam menemukan bahwa motor PM BLDC layak digunakan karena memiliki kepadatan daya, efisiensi, dan kapasitas torsi yang tinggi. Motor dengan *interior permanent magnet* (IPM) dan motor dengan *surface permanent magnet* (SPM) adalah dua jenis motor PM BLDC yang sering digunakan dalam aplikasi traksi. Sejumlah parameter menjadi pertimbangan dalam perbandingan antara motor IPM dan SPM [22].

Dibandingkan dengan motor SPM, motor IPM memiliki kepadatan daya, efisiensi, dan torsi yang unggul. Desain rotor magnet yang tertanam atau terkubur pada motor IPM memaksimalkan pemanfaatan magnet dan keluaran daya per volume [22]. Motor IPM lebih efisien pada kecepatan tinggi

karena distribusi fluks yang lebih baik serta lokasi magnet yang optimal [23].

Motor IPM memiliki riak torsi yang lebih rendah dibandingkan dengan motor SPM. Penataan magnet pada motor IPM, terutama dalam konfigurasi tipe datar dan bentuk V, mengurangi fenomena *cogging* dan meningkatkan kinerja secara keseluruhan, terutama pada kecepatan tinggi [23]. Gambar 1 menampilkan topologi mesin listrik [24].

Menurut hasil investigasi terbaru, desain magnet bentuk V semakin populer dalam aplikasi traksi seperti propulsi kapal listrik [25]. Data penelitian yang substansial menunjukkan bahwa distribusi magnet yang akurat dari konfigurasi bentuk V dapat mengurangi torsi *cogging*. Dengan meminimalkan variasi medan magnet selama rotasi rotor, konfigurasi ini menghasilkan torsi keluaran yang lebih merata pada setiap putaran. Susunan bentuk V memiliki kepadatan torsi yang lebih tinggi dibandingkan susunan lainnya. Keluaran torsi yang tinggi per satuan volume sangat penting pada aplikasi traksi. Selama proses manuver, tuntutan permintaan kecepatan pada pendorong perahu cenderung fluktuatif, sehingga fleksibilitas ini sesuai dengan hal tersebut. Berdasarkan uraian, motor magnet permanen dalam penelitian ini adalah suatu motor BLDC dengan IPM berbentuk V (motor IPM-V).

Proses perancangan dimulai dengan melakukan konfigurasi motor, yaitu menentukan pengaturan motor IPM-V. Faktor-faktor seperti jumlah kutub, dimensi stator dan rotor, serta pengaturan magnet dianalisis untuk mengoptimalkan daya, efisiensi, dan torsi. Setelah melakukan konfigurasi motor, perancangan desain difokuskan pada jumlah lilitan dan pengaturan lilitan stator yang secara signifikan memengaruhi karakteristik tegangan dan arus. Berbagai konfigurasi lilitan dieksplorasi guna menemukan kinerja yang optimal.

Berdasarkan materi yang tersedia, kinerja motor harus dioptimalkan. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan dan simulasi untai magnetik, dengan menganalisis menggunakan elemen hingga (*finite element analysis* - FEA) terhadap sebuah model lengkap guna mengevaluasi fluks magnetik, kekuatan medan, dan rugi-rugi, dengan tujuan memperbaiki parameter desain. Analisis kinerja melibatkan evaluasi terhadap daya masukan dan keluaran, torsi, efisiensi, dan permasalahan suhu untuk memastikan kinerja yang sesungguhnya. Metodologi yang digunakan dalam perancangan motor BLDC dengan memanfaatkan Ansys Maxwell ditunjukkan pada Gambar 2.

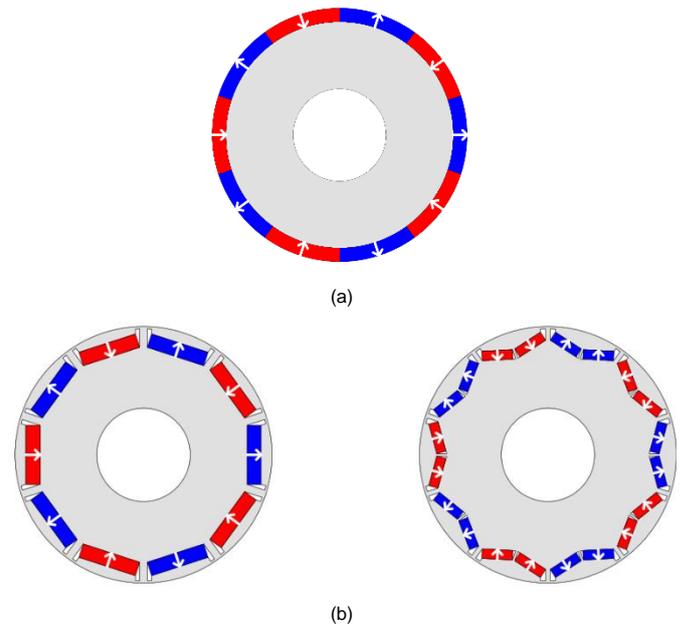
Penelitian ini berfokus pada analisis motor IPM-V menggunakan FEA. FEA merupakan metode pemodelan dan simulasi berbagai parameter motor listrik. Metode ini memfasilitasi representasi konfigurasi geometris motor serta pemahaman terhadap interaksi yang kompleks antara medan magnetik, kumparan, dan komponen-komponen lainnya [26].

A. DESAIN MOTOR IPM-V

Pada bagian ini, komponen motor IPM-V, termasuk inti rotor, inti stator dan lilitannya, dirancang dan dihitung dengan cermat.

1) ROTOR

Konfigurasi magnet pada rotor mampu memengaruhi distribusi medan magnet serta interaksi fluks dengan stator, sehingga memengaruhi torsi, tegangan gerak listrik (TGL) balik, dan daya keluaran [22]. Distribusi torsi dan fluks magnetik juga dapat dipengaruhi oleh bentuk kutub rotor. Perhitungan untuk menentukan diameter rotor (D_r) [27] merujuk pada (1).



Gambar 1. Topologi motor BLDC, (a) SPM, (b) IPM tipe datar dan bentuk V.



Gambar 2. Prosedur desain motor BLDC menggunakan Ansys Maxwell.

$$T = kD_r L \quad (1)$$

dengan T adalah torsi, k adalah konstanta, dan L adalah panjang aksial motor. Berdasarkan (1), diameter rotor dan panjang motor yang sesuai dengan torsi yang diinginkan dapat dihitung.

2) STATOR

Desain stator mencakup geometri dan pengaturan lilitannya. Parameter geometri stator, seperti jumlah dan dimensi slot, bentuk inti, dan dimensi *yoke* sangat penting untuk memastikan distribusi fluks magnetik yang optimal, meminimalkan rugi-rugi magnetik, dan meningkatkan kinerja motor [28].

Perancangan slot stator perlu menentukan ukuran dan bentuknya. Slot stator yang digunakan untuk mengakomodasi lilitan stator memiliki dampak besar terhadap distribusi fluks magnetik di dalam mesin. Oleh karena itu, pemilihan desain slot sangat memengaruhi parameter-parameter penting, seperti faktor ruang lilitan, saturasi magnetik, dan rugi-rugi tembaga. Konfigurasi slot yang berbeda, seperti bentuk bulat, persegi panjang, atau trapesium, dapat dievaluasi untuk menentukan desain yang paling sesuai [29]. Diameter stator bagian dalam (D_{is}) [27] mengacu pada (2).

$$D_{is} = D_r + 2\delta \quad (2)$$

dengan δ adalah celah udara. Penentuan diameter stator luar juga memperhitungkan diameter stator dalam dan ruangan yang tersedia di dalam rumah dari mesin perahu.

Desain stator juga mencakup desain gigi stator. Lebar gigi stator (t) [30] didefinisikan oleh (3).

$$t = \tau \times \lambda \quad (3)$$

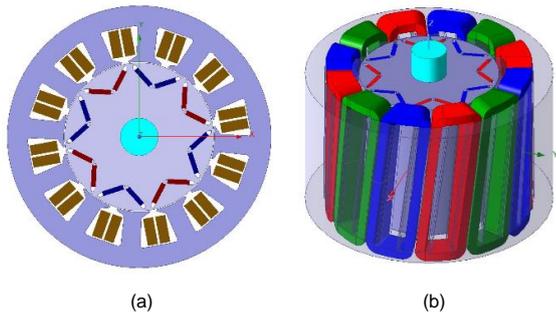
dengan λ adalah jarak antar gigi dan τ adalah rasio lebar gigi terhadap jarak antar slot (*slot pitch*).

TABEL II
PARAMETER DESAIN MOTOR

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Tipe motor	BLDC IPM-V	-
2	Tegangan	72	Vdc
3	Jumlah fase	3	-
4	Jumlah slot	12	-
5	Jumlah kutub	8	-
6	Diameter luar stator	175	mm
7	Diameter luar rotor	98,8	mm
8	Panjang laminasi	105	mm
9	Sudut miring stator	10	°
10	Tebal magnet	3	mm
11	Lebar magnet	14.3	mm

TABEL III
MATERIAL MOTOR BLDC

No	Komponen	Material
1	Inti stator	50JN1300
2	Inti rotor	50JN1300
3	Kabel	Tembaga
4	Magnet permanen	NdFe52 (hingga 120 °C)
5	Kelas isolasi	H



Gambar 3. Desain motor IPM-V, (a) 2D, (b) 3D.

Secara umum, motor BLDC menunjukkan tiga jenis torsi yang berbeda, yaitu torsi mutual, *reluctance torque*, dan torsi *cogging*. *Reluctance torque*, yang timbul dari interaksi antara magnet permanen yang tertanam dalam rotor dan slot stator, merupakan karakteristik intrinsik dari motor BLDC, terutama pada motor dengan konfigurasi motor IPM-V [31].

Beragam metode telah diterapkan dalam perancangan slot stator guna mengurangi torsi *cogging*. Metode tersebut melibatkan penghilangan slot, penggunaan slot miring atau berbentuk tidak beraturan, serta pemilihan jumlah slot dan kutub dengan cermat. Penerapan desain yang efisien telah menunjukkan potensi untuk mengurangi torsi *cogging* [32].

Parameter yang signifikan, seperti jumlah slot (N_s) dan sudut kemiringan (α_{sk}) [33], dapat ditentukan dengan menggunakan (4).

$$\alpha_{sk} = \frac{360^\circ}{N_s N_{period}} \quad (4)$$

dengan N_{period} adalah periode torsi *cogging pitch* slot tunggal. Persamaan (4) menunjukkan keterkaitan antara N_{period} dan sudut kemiringan ideal untuk meminimalkan torsi *cogging*.

Periode torsi *cogging pitch* slot tunggal dinyatakan dengan N_{period} [33]. Persamaan (5) menjelaskan pengaruh N_{period} terhadap sudut kemiringan yang ideal untuk meminimalkan torsi *cogging*. Faktor sekutu tertinggi antara kutub dan slot stator dinyatakan dengan HCF .

$$N_{period} = \frac{N_p}{HCF(N_s, N_p)} \quad (5)$$

Dengan menggunakan (3) dan (4), sudut kemiringan sebesar 15° dihitung untuk motor IPM-V yang memiliki 12 slot stator dan 8 kutub. Penggunaan sudut kemiringan sebesar 15° dapat menyulitkan dan bisa meningkatkan biaya produksi.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, motor BLDC dengan sudut kemiringan antara 6° dan 15° dapat mempertahankan

torsi *cogging* di bawah 10% dari torsi yang terukur [34]. Dengan merujuk pada konsep tersebut, penelitian ini melakukan analisis teoretis dan perhitungan akurat terhadap motor BLDC yang memiliki 12 slot stator dan 8 kutub. Tujuannya adalah untuk mencapai keseimbangan antara peningkatan kinerja dan efisiensi produksi. Pada penelitian dengan sudut kemiringan berkisar antara 6° hingga 15° , batas maksimum torsi *cogging* ditetapkan sebesar 10% dari torsi yang terukur [34].

Penelitian (ini) menyarankan penggunaan motor dengan sudut kemiringan antara 6° dan 15° dengan mempertimbangkan kemudahan dalam proses produksinya. Dengan menggunakan rentang tersebut, torsi *cogging* dapat dikurangi sekaligus mempermudah proses pabrikasi [34]. Strategi ini menciptakan keseimbangan yang tepat antara pemahaman teoretis dan keterbatasan dalam praktik pabrikasi.

3) LILITAN

Penyusunan lilitan merujuk pada lilitan stator yang didistribusikan di dalam slot. Terdapat dua jenis susunan lilitan yang umum digunakan: lilitan terpusat dan lilitan terdistribusi. Lilitan terpusat menempatkan semua lilitannya pada satu slot, sedangkan lilitan terdistribusi membagi lilitannya di antara beberapa slot. Pilihan penyusunan kumparan berdampak pada faktor-faktor seperti faktor lilitan, rugi-rugi tembaga, dan kinerja elektromagnetik. Pemilihan susunan lilitan yang sesuai dengan kebutuhan spesifik motor dan pengoptimalan distribusi medan magnet merupakan hal yang penting [35].

Bagian integer menggunakan persamaan berikut untuk menentukan rentang nominal [27] dalam slot.

$$S = \max\left(\text{fix}\left(\frac{N_s}{p}\right), 1\right) \quad (6)$$

dengan N_s adalah jumlah slot stator dan p adalah jumlah kutub. Fungsi $\max(.,.)$ memastikan bahwa ketika jumlah slot stator kurang dari jumlah kutub, nilai rentang kumparan adalah minimal satu slot.

Setelah perhitungan dilakukan, diputuskan untuk menggunakan susunan lilitan terdistribusi pada motor IPM-V. Parameter desain motor disajikan dalam Tabel II. Desain motor IPM-V diperoleh dari desain stator, lilitan, rotor, dan magnet permanen, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.

B. PEMILIHAN MATERIAL

Agar kinerja dan masa pakai motor perahu listrik IPM-V dapat ditingkatkan, bahan-bahan dipilih dengan teliti, terutama untuk komponen intinya. Salah satunya adalah inti stator, sebuah komponen motor yang dibuat dari lembaran baja listrik terlamnasi berkualitas tinggi dengan rugi-rugi inti rendah. Material yang digunakan untuk stator dan inti rotor adalah 50JN1300 karena karakteristik materialnya sesuai untuk motor listrik, seperti permeabilitas magnetik yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, dan kekuatan mekanis yang tinggi pula. Hal ini membuat 50JN1300 menjadi pilihan paling

tepat untuk memastikan konversi energi yang efisien serta daya tahan yang baik dalam pengoperasian motor listrik. Slot rotor diisi dengan magnet permanen menggunakan material NdFeB, atau dikenal sebagai magnet neodimium tipe NdFe52, yang memiliki keunggulan dalam sifat magnetiknya, seperti kekuatan magnetik dan koersivitas yang tinggi. Magnet ini sudah sering digunakan pada perangkat kerja dan sistem propulsi kendaraan berkinerja tinggi [36]. Hasil pemilihan material disajikan dalam Tabel III.

C. PEMODELAN DAN SIMULASI UNTAI MAGNETIK

Tujuan dari simulasi elektromagnetik adalah untuk memperoleh dan menganalisis sejumlah parameter yang berbeda menggunakan Ansys Maxwell, seperti torsi, torsi *cogging*, arus, daya keluaran dan masukan, efisiensi, distribusi medan magnet, dan suhu motor.

1) TORSI

Ansys Maxwell memperkirakan torsi elektromagnetik dengan memodelkan interaksi elektromagnetik stator-rotor. Karakteristik torsi diprediksi secara akurat menggunakan kekuatan medan magnet, posisi rotor, dan arus lilitan.

2) TORSI COGGING

Ansys Maxwell dapat menyimulasikan torsi *cogging* dengan memeriksa magnet permanen pada rotor dan gigi stator. Hal ini berguna untuk mengidentifikasi masalah dalam desain motor yang terkait dengan *cogging*.

3) ARUS

Ansys Maxwell dapat menyimulasikan distribusi arus pada lilitan motor dalam berbagai kondisi beban dan kecepatan. Simulasi ini merinci perilaku arus dengan memperhitungkan induksi dan resistansi elektromagnetik.

4) DAYA KELUARAN

FEA menghitung daya keluaran dengan menyimulasikan interaksi mekanis motor, seperti rotasi rotor dan kerja beban. Pendekatan ini mengevaluasi keluaran mekanis motor. Daya keluaran motor dapat dihitung dari torsi simulasi Ansys Maxwell dan data kecepatan terhadap waktu seperti pada (7).

$$P_{out} = S \times T \quad (7)$$

dengan S adalah jumlah kecepatan putaran dalam rpm, dan T adalah torsi dalam Nm.

5) DAYA MASUKAN

FEA menawarkan kemampuan untuk membuat model daya masukan motor, mengukur rugi-rugi dalam untaian magnetik, rugi-rugi tembaga lilitan, dan rugi-rugi inti untuk memperkirakan total daya masukan dalam berbagai situasi operasional. Dalam perangkat lunak Ansys Maxwell, (8) dan (9) digunakan untuk menghitung daya masukan.

$$P_{TotalLoss} = P_{CoreLoss} + P_{StrandedLoss} \quad (8)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{TotalLoss} \quad (9)$$

dengan $P_{TotalLoss}$ adalah rugi-rugi total dalam simulasi elektromagnetik, yang meliputi rugi-rugi inti yang disimbolkan dengan $P_{CoreLoss}$ dan rugi-rugi tembaga yang disimbolkan dengan $P_{StrandedLoss}$. Selanjutnya, perhitungan daya masukan dilakukan dengan menjumlahkan (7) dan (8).

6) EFISIENSI

Efisiensi motor dapat diukur menggunakan hasil simulasi FEA dengan membagi daya keluaran terhadap daya masukan, seperti yang ditunjukkan pada (10).

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

7) DISTRIBUSI MEDAN MAGNETIK

Ansys Maxwell unggul dalam memvisualisasikan serta menganalisis distribusi medan magnet dalam motor. Hal ini termasuk menilai kerapatan fluks, yang memiliki peran penting dalam mengoptimalkan kinerja motor.

8) SUHU MOTOR

FEA dapat digunakan untuk menganalisis suhu dengan memperhitungkan sifat bahan, terjadinya panas akibat rugi-rugi, dan mekanisme perpindahan panas di dalam motor. Metode ini memungkinkan prediksi distribusi suhu, memastikan bahwa motor beroperasi dalam batas suhu yang aman [37].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi motor IPM-V dianalisis secara komprehensif untuk menilai kinerja dan efisiensinya. Evaluasi kinerja digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan desain motor IPM-V memenuhi tujuan desainnya. Sebaliknya, penilaian efisiensi menggunakan hasil simulasi perangkat lunak FEA untuk mengevaluasi tingkat efisiensi motor.

Hasil investigasi komprehensif ini dianggap cukup mewakili karena menggunakan data rata-rata dari operasi motor yang stabil. Parameter keluaran simulasi mencakup torsi, torsi *cogging*, arus, daya keluaran, daya masukan, efisiensi, dan distribusi medan magnet. Simulasi FEA mencakup kecepatan yang diinginkan dan kecepatan maksimum. Analisis pada kondisi yang serupa dengan mesin pembakaran internal yang ada, sedangkan analisis pada kecepatan maksimum memeriksa potensi dan kinerja motor dalam mengembangkan sistem propulsi untuk kapal yang menggunakan mesin yang ada.

Penelitian ini memperkirakan suhu motor menggunakan simulasi sebagai tambahan dari metrik kinerja dan efisiensi. Kecepatan dan durasi motor digunakan untuk menilai perubahan suhu. Skenario simulasi ini didasarkan pada pemahaman yang mendalam tentang operasi kapal listrik di dunia nyata, termasuk penangkapan ikan dan pencarian ikan.

1) TORSI

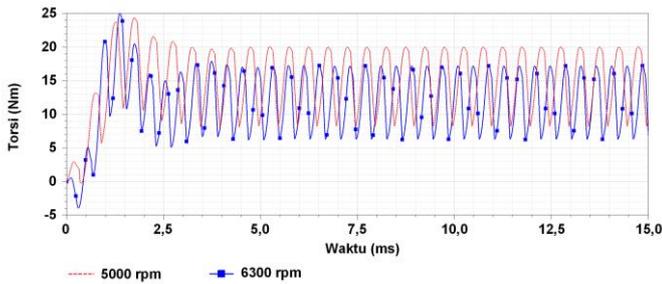
Dalam sistem propulsi, salah satu parameter penting yang harus dipenuhi oleh motor dalam menjalankan kinerjanya adalah torsi. Dalam penelitian ini, parameter torsi motor IPM-V dianalisis berdasarkan kebutuhan sistem propulsi kapal. Torsi motor IPM-V ditunjukkan pada Gambar 4.

Setelah mencapai kondisi operasional yang stabil, yang terjadi dalam durasi 5 ms, terlihat bahwa torsi rata-rata pada 5.000 rpm mencapai 15,15 Nm. Sementara itu, pada 6.300 rpm, torsi rata-rata tercatat 12,19 Nm. Dibandingkan dengan persyaratan torsi untuk traksi kapal listrik, motor ini menghasilkan torsi sekitar 15 Nm pada 5.000 rpm, sedangkan pada 6.300 rpm, torsi yang dihasilkan sekitar 11,9 Nm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa motor IPM-V ini memenuhi kriteria torsi yang diperlukan untuk aplikasi propulsi perahu listrik.

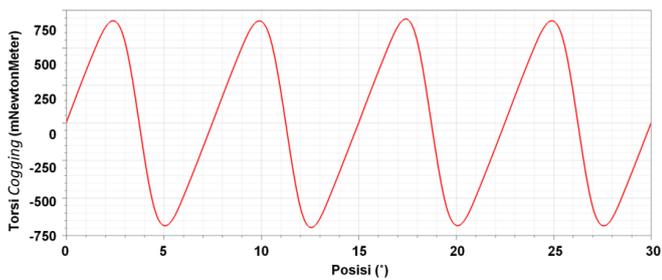
2) TORSI COGGING

Torsi *cogging* adalah torsi periodik yang muncul saat rotor motor BLDC bergerak. Penggunaan sudut kemiringan 10° pada stator bertujuan untuk mengurangi torsi tersebut hingga kurang dari 10% dari torsi terukur atau torsi maksimum. Kurva torsi *cogging* ditunjukkan pada Gambar 5.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa torsi *cogging* dari puncak ke puncak adalah sebesar 1,386 Nm dengan



Gambar 4. Grafik torsi motor IPM-V.



Gambar 5. Grafik torsi cogging motor IPM-V.

memperhitungkan torsi terukur sebesar 15,15 Nm, sehingga menghasilkan persentase torsi cogging sekitar 8,49%. Hasil ini sesuai dengan target yang telah ditentukan, yaitu memastikan bahwa torsi cogging harus tetap berada di bawah 10% dari torsi terukur.

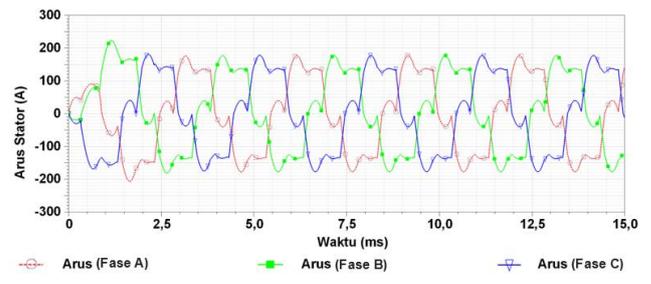
3) ARUS STATOR

Arus stator merujuk pada aliran arus listrik melalui stator motor IPM-V, yang merupakan komponen motor yang tidak bergerak dan tidak berputar. Fungsi utama arus stator adalah menciptakan medan magnet di dalam stator. Medan magnet ini berinteraksi dengan rotor untuk menghasilkan gerakan mekanis. Arus stator terdiri atas tiga fase yang mendorong proses rotasi. Oleh karena itu, penting untuk memeriksa arus stator guna memahami perubahan intensitas dan polaritas medan magnet selama putaran motor. Kurva arus stator dapat dilihat pada Gambar 6.

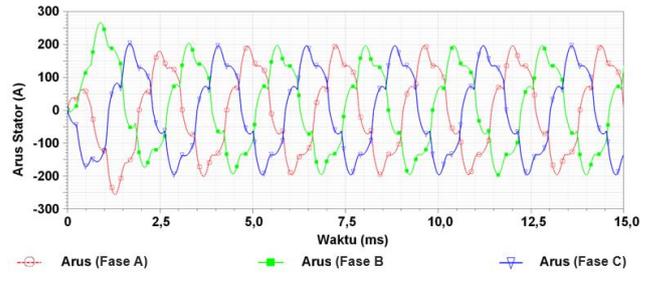
Pada Gambar 6 terlihat bahwa saat motor IPM-V beroperasi pada 5.000 rpm, motor tersebut menghasilkan torsi 15,15 Nm dalam kondisi stabil dengan menggunakan arus rata-rata 102,48 A dan arus maksimum 176,85 A. Ketika mencapai 6.300 rpm, motor ini membutuhkan arus rata-rata 114,16 A dengan arus maksimum 196,38 A untuk menghasilkan torsi sebesar 12,19 Nm. Gelombang arus stator yang tergambar menunjukkan distribusi yang seimbang di antara ketiga fase, yang berpengaruh pada polaritas medan magnet dan kehalusan putaran motor. Dari hasil simulasi ini, terlihat bahwa peningkatan kecepatan putaran membutuhkan adanya peningkatan arus. Temuan dari simulasi ini dapat menjadi panduan dalam memilih baterai yang cocok untuk sistem propulsi kapal listrik.

4) DAYA KELUARAN

Interaksi antara medan magnet dan material magnetik dalam motor dapat menghasilkan daya mekanis yang dapat diukur. Analisis daya mekanis ini penting dilakukan guna memahami daya keluaran yang dihasilkan oleh motor listrik. Daya mekanis ini dapat dihitung dengan mengalikan data kecepatan putar motor dengan torsi motor. Kurva keluaran daya untuk kecepatan 5.000 rpm dan 6.300 rpm ditampilkan pada Gambar 7.

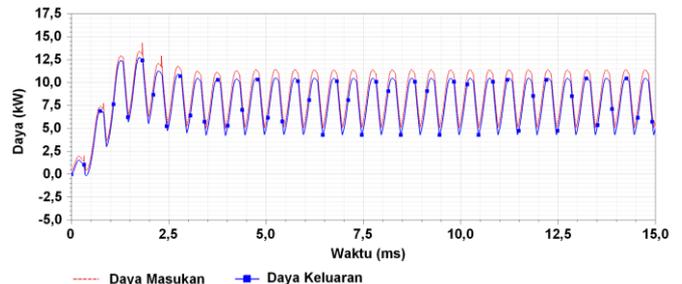


(a)

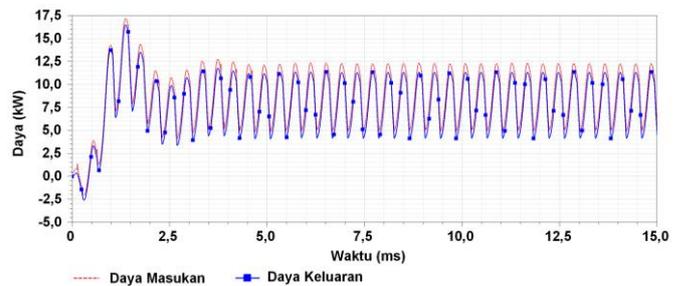


(b)

Gambar 6. Grafik arus motor IPM-V, (a) 5.000 rpm, (b) 6.300 rpm.



(a)



(b)

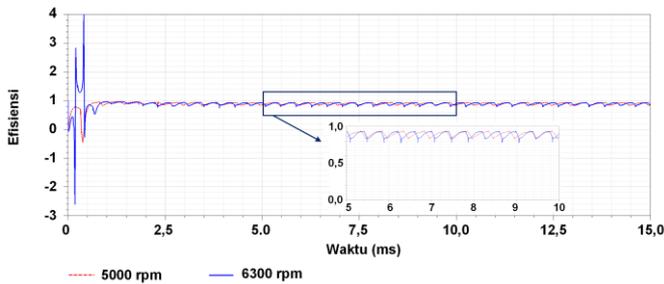
Gambar 7. Grafik daya masukan dan keluaran motor IPM-V, (a) 5.000 rpm, (b) 6.300 rpm.

Daya keluaran motor listrik dihitung ketika putaran motor listrik telah stabil, yaitu setelah 5 ms. Daya keluaran rata-rata yang tercatat saat putaran motor mencapai 5.000 rpm adalah 7,93 kW, sementara pada putaran 6.300 rpm adalah 8,04 kW.

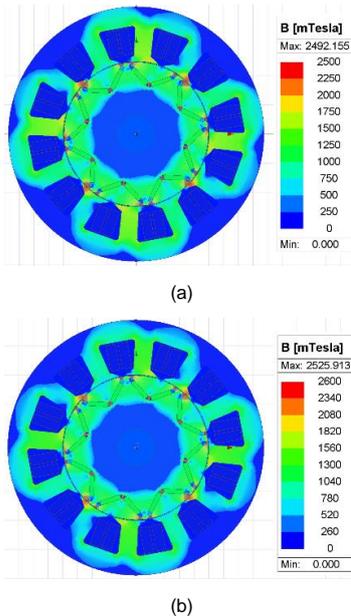
5) DAYA MASUKAN

Analisis daya masukan pada motor IPM-V dilakukan dengan menggunakan metode yang telah ditentukan, seperti yang dibahas pada Bagian III, dengan menjumlahkan daya keluaran dan rugi-rugi. Rugi-rugi yang diperhitungkan dalam FEA berbasis elektromagnetik adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga. Berdasarkan hasil dari simulasi FEA, nilai daya masukan ditunjukkan pada Gambar 7.

Daya masukan motor listrik dihitung ketika putaran motor listrik mencapai kestabilan dalam waktu 5 ms. Daya masukan rata-rata yang tercatat saat motor berputar pada kecepatan



Gambar 8. Grafik efisiensi motor IPM-V



Gambar 9. Grafik distribusi medan magnet, (a) 5.000 rpm, (b) 6.300 rpm.

5.000 rpm adalah 8,82 kW, sementara pada 6.300 rpm mencapai 8,95 kW.

6) EFISIENSI

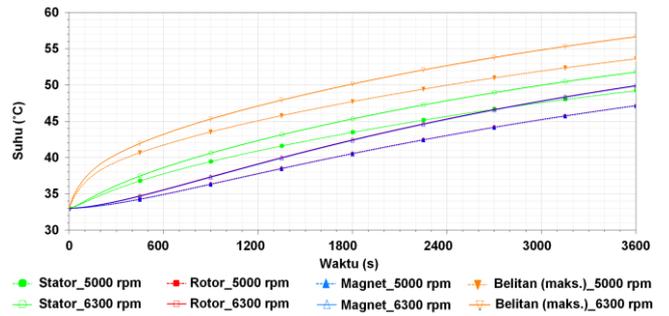
Efisiensi pada motor IPM-V merujuk pada kemampuan motor dalam mengonversi daya masukan, yakni total daya yang diserap oleh motor dari sumber energi listrik menjadi daya keluaran dalam bentuk daya mekanis berupa torsi dan putaran. Hasil perhitungan efisiensi disajikan pada Gambar 8.

Efisiensi motor listrik dihitung setelah putaran motor stabil, yang biasanya terjadi dalam waktu 5 ms. Pada kecepatan 5.000 rpm, efisiensi rata-rata yang diperoleh adalah 89,34%, dengan efisiensi terendah mencapai 82,32% dan tertinggi mencapai 94,28%. Pada kecepatan 6.300 rpm, efisiensi rata-rata turun menjadi 88,90%, dengan efisiensi terendah mencapai 77,17% dan tertinggi mencapai 93,65%. Tingkat efisiensi motor yang lebih tinggi menandakan konversi daya listrik yang lebih efisien menjadi daya mekanis yang berguna. Terlihat bahwa peningkatan kecepatan berhubungan dengan penurunan efisiensi, khususnya karena peningkatan rugi-rugi.

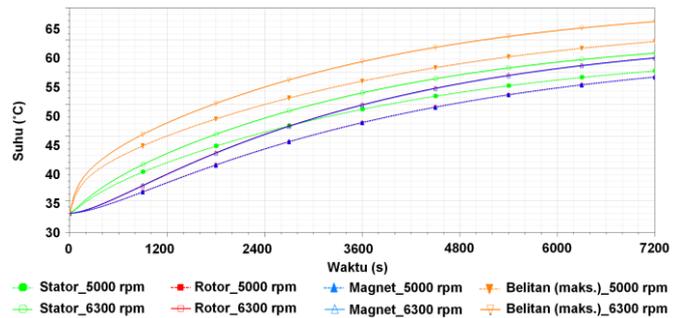
7) DISTRIBUSI MEDAN MAGNET

Plot medan magnet yang dihasilkan menggambarkan pola dan intensitas medan magnet di berbagai bagian motor. Distribusi medan magnet yang merata dan terkonsentrasi di area yang diinginkan menunjukkan efektivitas desain magnet permanen dalam menghasilkan medan magnet yang diperlukan untuk mengubah energi. Hasil simulasi distribusi medan magnet disajikan pada Gambar 9.

Dari hasil simulasi FEA, pada kecepatan putar 5.000 rpm, kerapatan fluks tertinggi yang tercatat adalah 2,492 T untuk



(a)



(b)

Gambar 10. Grafik suhu, (a) 5.000 rpm, (b) 6.300 rpm.

TABEL IV
RINGKASAN HASIL SIMULASI

No	Parameter	Kecepatan (rpm)	
		5.000	6.300
1	Torsi (Nm)	15,15	12,19
2	Torsi cogging (Nm)	1,386	
3	Arus stator (rata-rata) (A)	102,48	114,16
4	Daya masukan kW	8,82	8,95
5	Daya keluaran kW	7,93	8,04
6	Efisiensi (rata-rata) (%)	89,34	88,90
7	Kerapatan fluks stator (T)	2,09	2,11
8	Suhu tertinggi (°C)		
a. Operasi satu jam			
	- Stator dan lilitan	53,59	56,62
	- Rotor dan magnet permanen	47,15	49,90
b. Operasi dua jam			
	- Stator dan lilitan	59,73	62,83
	- Rotor dan magnet permanen	54,21	57,18

rotor dan 2,09 T untuk stator. Sementara itu, pada kecepatan putar 6.300 rpm, kerapatan fluks tertinggi yang tercatat mencapai 2,526 T untuk rotor dan 2,11 T untuk stator.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran mengakibatkan peningkatan kerapatan fluks di dalam motor. Tingginya kerapatan fluks dapat menyebabkan peningkatan energi panas yang dihasilkan di dalam motor. Hal ini dapat menyebabkan suhu motor menjadi lebih tinggi [38]. Peningkatan suhu dapat mempercepat proses penuaan berbagai komponen motor, seperti kabel lilitan, insulasi, dan magnet permanen. Oleh karena itu, analisis suhu motor sebagai akibat dari tingginya kerapatan fluks pada motor penting untuk dilakukan.

8) SUHU MOTOR

Pemanfaatan motor IPM-V dalam aplikasi perahu listrik dimaksudkan untuk mengandalkan sistem pendingin udara alami. Oleh karena itu, perlu dipastikan bahwa suhu motor

IPM-V tetap stabil dalam batas yang aman saat beroperasi, sebagaimana ditentukan melalui simulasi suhu. Berdasarkan kebutuhan desain, ada dua skenario operasional, yaitu penangkapan ikan dengan waktu operasi satu jam dan pencarian ikan dengan waktu operasi dua jam. Simulasi suhu dilakukan pada dua kecepatan yang berbeda, yakni 5.000 rpm dan 6.300 rpm. Kondisi untuk simulasi suhu motor IPM-V adalah sebagai berikut.

- Pendingin motor : udara alami
- Suhu sekitar : 33 °C
- Suhu awal : 33 °C

Hasil simulasi yang disajikan dalam artikel ini berfokus pada titik-titik penting, seperti lilitan, inti stator, inti rotor, dan magnet. Hal ini dilakukan karena faktor-faktor tersebut memengaruhi resistansi lilitan, pengawamagnetan magnet permanen, dan masa pakai komponen. Gambar 10 menyajikan hasil simulasi suhu pada kecepatan 5.000 rpm dan 6.300 rpm

Berdasarkan hasil simulasi suhu, pada kecepatan 5.000 rpm selama satu jam, suhu tertinggi terjadi pada inti stator dan lilitan, yaitu mencapai 53,59 °C. Sementara itu, suhu tertinggi yang tercatat pada inti rotor dan magnet permanen adalah 47,15 °C. Ketika kecepatan meningkat menjadi 6.300 rpm selama satu jam, suhu paling tinggi yang tercatat pada inti stator dan lilitan mencapai 56,62 °C. Adapun suhu tertinggi yang tercatat pada inti rotor dan magnet permanen adalah 49,90 °C.

Untuk simulasi yang berlangsung pada kecepatan 5.000 rpm selama dua jam, suhu paling tinggi terdeteksi di inti stator dan lilitan, yang mencapai 59,73 °C, sedangkan pada inti rotor dan magnet permanen, suhu puncak yang tercatat adalah 54,21 °C. Pada percobaan terakhir dengan kecepatan 6.300 rpm selama dua jam, temperatur tertinggi diamati kembali di inti stator dan lilitan, yakni mencapai 62,83 °C. Sementara itu, pada inti rotor dan magnet permanen, suhu maksimum yang tercatat adalah 57,18 °C.

Hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa motor IPM-V tetap pada suhu yang aman saat digunakan selama satu jam dalam operasi penangkapan ikan dan dua jam dalam operasi pencarian ikan. Hal tersebut sesuai dengan penggunaan insulasi kelas H dan tingkat magnet permanen yang dapat mencapai suhu hingga 120 °C. Rangkuman hasil simulasi motor IPM-V pada kecepatan 5.000 rpm dan 6.300 rpm dapat dilihat dalam Tabel IV.

V. KESIMPULAN

Penelitian pada model motor BLDC IPM-V di perahu listrik dilakukan menggunakan simulasi Ansys Maxwell FEA untuk mengamati torsi, torsi *cogging*, arus stator, daya keluaran, daya masukan, efisiensi, distribusi medan magnet, dan suhu. Dari hasil simulasi tersebut, diketahui bahwa motor BLDC IPM-V mampu beroperasi pada 5.000 rpm dengan daya masukan sebesar 8,82 kW dan daya keluaran 7,93 kW, serta menghasilkan torsi sebesar 15,62 Nm, sesuai dengan parameter desain yang ditetapkan untuk aplikasi perahu listrik. Simulasi menunjukkan bahwa motor memiliki efisiensi daya rata-rata sebesar 89% dan arus stator yang seimbang untuk putaran motor yang lancar.

Perhitungan juga menunjukkan bahwa motor BLDC IPM-V dapat mencapai 6.300 rpm, menghasilkan torsi sebesar 12,19 Nm, daya masukan 8,95 kW, daya keluaran 8,04 kW, serta efisiensi daya mencapai 88,90%. Ketika mencapai 8,49% dari torsi nominal, nilai torsi *cogging* yang didapat dari simulasi berada dalam ambang batas 10%. Simulasi distribusi medan magnet menunjukkan batasan operasional yang aman. Dari segi

batasan material, motor beroperasi dengan aman. Hasil simulasi untuk setiap parameter menunjukkan kualitas motor yang baik. Namun demikian, sangat penting untuk memvalidasi temuan pemodelan ini dengan melakukan eksperimen nyata pada motor.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan terkait artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Dewi Rianti Mandasari dan Cuk Supriyadi Ali Nandar; metodologi, Dewi Rianti Mandasari dan Budi Sudiarto; perangkat lunak, Dewi Rianti Mandasari; validasi, Dewi Rianti Mandasari dan Cuk Supriyadi Ali Nandar; investigasi, Cuk Supriyadi Ali Nandar; sumber daya, Cuk Supriyadi Ali Nandar; kurasi data, Dewi Rianti Mandasari dan Lia Amelia; penulisan – penyusunan draf asli, Dewi Rianti Mandasari dan Lia Amelia; penulisan – peninjauan dan penyuntingan, Budi Sudiarto; visualisasi, Dewi Rianti Mandasari; pengawasan, Budi Sudiarto; administrasi proyek, Lia Amelia; akuisisi pendanaan, Cuk Supriyadi Ali Nandar

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mendukung penelitian ini.

REFERENSI

- [1] (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, [Online], <https://iris.who.int/handle/10665/345329>, tanggal akses: 20-Sep-2023.
- [2] (2020) Situs web State of Global Air, [Online], <https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/plot>, tanggal akses: 20-Sep-2023.
- [3] N.A. Istiqomah dan N.N.N. Marleni, "Particulate air pollution in Indonesia: Quality index, characteristic, and source identification," *IOP Conf. Ser., Earth Environ. Sci.*, 2020, hal. 1–8, doi: 10.1088/1755-1315/599/1/012084.
- [4] (2023) Solusi untuk Polusi Udara di Jakarta, [Online], www.vitalstrategies.org/source-apportionment-report, tanggal akses: 20-Sep-2023.
- [5] (2023) World Energy Balances: Overview, [Online], <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, tanggal akses: 20-Sep-2023.
- [6] D. Vinezzia, "Identifikasi bahaya keselamatan dan kesehatan kerja pada aktivitas nelayan," *J. Penelit. Perawat Profesional*, vol. 3, no. 1, hal. 117–126, Feb. 2021, doi: 10.37287/jppp.v3i1.345.
- [7] S.A.K.M. Niapour dkk., "Review of permanent-magnet brushless dc motor basic drives based on analysis and simulation study," *Int. Rev. Elect. Eng. (I.R.E.E.)*, vol. 9, no. 5, hal. 930–957, Sep./Okt. 2014.
- [8] A.Y. Hassan, A.G. Rohieem, dan S.M.S. Salem, "Direct torque control of non-salient pole AFPMSMs with SVPWM inverter," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. (IJPEDS)*, vol. 13, no. 4, hal. 2014–2023, Des. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i4.pp2014-2023.
- [9] B.V.R. Kumar dan K.S. Kumar, "Design of a new dual rotor radial flux BLDC motor with Halbach array magnets for an electric vehicle," *2016 IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. (PEDES)*, 2016, hal. 1–5, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914552.
- [10] M.A. Khalid dkk., "Performance analysis of brushless dc motor with optimum magnetic energy for bicycle application," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. (IJPEDS)*, vol. 12, no. 4, hal. 2113–2122, Des. 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2113-2122.
- [11] E. Elakkia, S.J. Anita, R.G. Ganesan, dan S. Saikiran, "Design and modelling of BLDC motor for automotive applications," *Int. J. Elect. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 1, no. 1, hal. 42–48, Mar. 2015.
- [12] J.M. Patel, H.V. Hirvaniya, dan M. Rathod, "Simulation and analysis of brushless dc motor based on sinusoidal PWM control," *Int. J. Innov. Res. Elect. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 2, no. 3, hal. 1236–1238, Mar. 2014.

- [13] A. Tashakori, M. Ektesabi, dan N. Hosseinzadeh, "Characteristics of suitable drive train for electric vehicle," *Int. Conf. Instrum. Meas. Circuits Syst. (ICIMCS 2011)*, 2011, hal. 535–541, doi: 10.1115/1.859902.paper119.
- [14] H. Kim dan B. Kwon, "Optimal design of motor shape and magnetisation direction to obtain vibration reduction and average torque improvement in IPM BLDC motor," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 11, no. 3, hal. 378–385, Mar. 2017, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0618.
- [15] J. Hur dan B.-W. Kim, "Rotor shape design of an interior PM type BLDC motor for improving mechanical vibration and EMI characteristics," *J. Elect. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, hal. 462–467, Sep. 2010, doi: 10.5370/JEET.2010.5.3.462.
- [16] C. He dan T. Wu, "Permanent magnet brushless dc motor and mechanical structure design for the electric impact wrench system," *Energies*, vol. 11, no. 6, hal. 1–24, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061360.
- [17] K.F. Rahmantlya dkk., "Kelautan dan perikanan dalam angka tahun 2022," Pusat Data, Statistik dan Informasi, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, Indonesia, 2022, vol. 1.
- [18] *Yamaha 9.9c 15c Service Manual*, Yamaha Motor Corporation, Cypress, AS, 2003.
- [19] X. Liu, H. Chen, J. Zhao, dan A. Belahcen, "Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, hal. 3533–3545, Jun. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2524415.
- [20] Safril dkk., "Design of cooling system on brushless dc motor to improve heat transfers efficiency," *Evergreen*, vol. 9, no. 2, hal. 584–593, Jun. 2022, doi: 10.5109/4794206.
- [21] J. Kuria dan P. Hwang, "Investigation of thermal performance of electric vehicle BLDC motor," *Int. J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–17, 2012.
- [22] J. Dong, Y. Huang, L. Jin, dan H. Lin, "Comparative study of surface-mounted and interior permanent-magnet motors for high-speed applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, hal. 1–4, Jun. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2514342.
- [23] H.-I. Park, J.-Y. Choi, K.-H. Jeong, dan S.-K. Cho, "Comparative analysis of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor for compressor of air-conditioning system in electric vehicles," *2015 9th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, 2015, hal. 1700–1705, doi: 10.1109/ICPE.2015.7168006.
- [24] Z.Q. Zhu dan Y.X. Li, "Modularity techniques in high performance permanent magnet machines and applications," *CES Trans. Elect. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 1, hal. 93–103, Mar. 2018, doi: 10.23919/TEMS.2018.8326455.
- [25] Y. Yang dkk., "Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications," *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 3, no. 1, hal. 86–97, Mar. 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2614972.
- [26] S. Li, W. Tong, S. Wu, dan R. Tang, "Analytical model for electromagnetic performance prediction of IPM motors considering different rotor topologies," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 59, no. 4, hal. 4045–4055, Jul./Agu. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3268639.
- [27] D.C. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Cranston, AS: The Writers' Collective, 2003.
- [28] Y. Guo dkk., "Parameter determination and performance analysis of a PM synchronous generator by magnetic field finite element analysis," *2007 Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, 2007, hal. 1–4, doi: 10.1109/AUPEC.2007.4548111.
- [29] W. Purwanto dkk., "Optimal design of stator slot geometry for high-speed spindle induction motor applications," *2019 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. (ICOIACT)*, 2019, hal. 811–816, doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938493.
- [30] J.R. Hendershot dan T.J.E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, 2nd ed. Venice, AS: Motor Design Books LLC, 2010.
- [31] S. Leitner, H. Gruebler, dan A. Muetze, "Cogging torque minimization and performance of the sub-fractional HP BLDC claw-pole motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 5, hal. 4653–4664, Sep./Okt. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2923569.
- [32] M. Zhou dkk., "Influence of magnet shape on the cogging torque of a surface-mounted permanent magnet motor," *Chin. J. Elect. Eng.*, vol. 5, no. 4, hal. 40–50, Des. 2019, doi: 10.23919/CJEE.2019.000026.
- [33] Y. Dönmezer dan L.T. Ergene, "Skewing effect on interior type BLDC motors," *The XIX Int. Conf. Elect. Mach. - ICEM 2010*, 2010, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607848.
- [34] D.R. Mandasari dkk., "Design and optimization of brushless dc motor for electric boat thruster," *Evergreen*, vol. 10, no. 3, hal. 1928–1937, Sep. 2023, doi: 10.5109/7151773.
- [35] J.K. Tangudu dan T.M. Jahns, "Comparison of interior PM machines with concentrated and distributed stator windings for traction applications," *2011 IEEE Vehicle Power Propul. Conf.*, 2011, hal. 1–8, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043171.
- [36] M. Toren, "Comparative analysis of the magnet effects on the permanent magnet BLDC motor performance used in electric vehicles," *Elect. Eng.*, vol. 104, no. 5, hal. 3411–3423, Okt. 2022, doi: 10.1007/s00202-022-01536-1.
- [37] S. Madhavan, R. Devdatta P B, E. Gundabattini, dan A. Mystkowski, "Thermal analysis and heat management strategies for an induction motor, a review," *Energies*, vol. 15, no. 21, hal. 1–20, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15218127.
- [38] F. Zhou dkk., "Study on steady-state temperature rise characteristics of motor heat balance under load rate," *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, vol. 2022, hal. 1–11, Jun. 2022, doi: 10.1155/2022/1147096.