

Analisis Daya Keluaran pada Kinerja Motor Listrik Tipe Synchronous Berbasis Komputasional

Analysis of Output Power in Computational-Based Synchronous Electric Motor Performance

Ferdyanto^{1*}, Auditya Farha², James Julian³, Fitri Wahyuni⁴, Reda Rizal⁵

^{1,2}Departement of Electrical Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta

^{3,4}Departement of Mechanical Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta

⁵Departement of Industrial Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta

Jalan Limo Raya, Limo, Depok 16514, (021)-7539050

ferdy@upnvj.ac.id^{1*}, auditya.farha@upnvj.ac.id², zames@upnvj.ac.id³, fitriwahyuni@upnvj.ac.id⁴,

reda.rizal@upnvj.ac.id⁵

Abstrak – Masalah yang menjadi pertimbangan dalam penggunaan motor listrik adalah daya keluaran yang dihasilkan pada saat motor bekerja. Penelitian ini berfokus pada analisis daya keluaran Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) yang akan diuji pada kecepatan tertentu serta ditinjau terhadap perubahan sudut torsi tiap putaran. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan analisis daya keluaran dengan karakteristik yang stabil serta kinerja PMSM yang menghasilkan efisiensi sesuai standar. Penelitian menggunakan metode komputasi dengan model finite element analysis (FEA) yang dilakukan dengan menggunakan software. Hasil dari penelitian ini diperoleh performa PMSM dengan arus input sebesar 1.5 kA pada setiap fasa sehingga motor dapat beroperasi dengan kecepatan 13300 rpm serta menghasilkan torsi sebesar 164 Nm. Fluks magnet yang terbentuk berada dalam kondisi stabil dengan nilai 0.02 Wb dan membentuk distribusi medan magnet yang merata pada setiap kumparan stator. Rata-rata daya keluaran maksimum yang dihasilkan jangkar rotor adalah 107.6 kW pada sudut torsi 114°. Penelitian telah berhasil memperoleh analisis daya keluaran pada PMSM melalui metode komputasi. Hasil analisis tersebut dapat menjadi acuan dalam proses manufaktur PMSM.

Kata Kunci: daya keluaran, rpm, sinkron, sudut torsi.

Abstract – The problem that is considered in the use of electric motors is the output power generated when the motor is working. This research focuses on analyzing the output power of a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) which will be tested at a certain speed and looking at changes in torque angle for each rotation. The aim of this research is to obtain an output power analysis with stable characteristics and PMSM performance that produces efficiency according to standards. The research uses computational methods with finite element analysis (FEA) models which are carried out using software. The results of this research obtained PMSM performance with an input current of 1.5 kA in each phase so that the motor can operate at a speed of 13300 rpm and produce a torque of 164 Nm. The magnetic flux formed is in a stable condition with a value of 0.02 Wb and forms an even magnetic field distribution in each stator coil. The average maximum output power produced by the rotor armature is 107.6 kW at a torque angle of 114°. Research has succeeded in obtaining output power analysis on PMSM through computational methods. The results of this analysis can be used as a reference in the PMSM manufacturing process.

Keywords: output power, rpm, synchronous, torque angle.

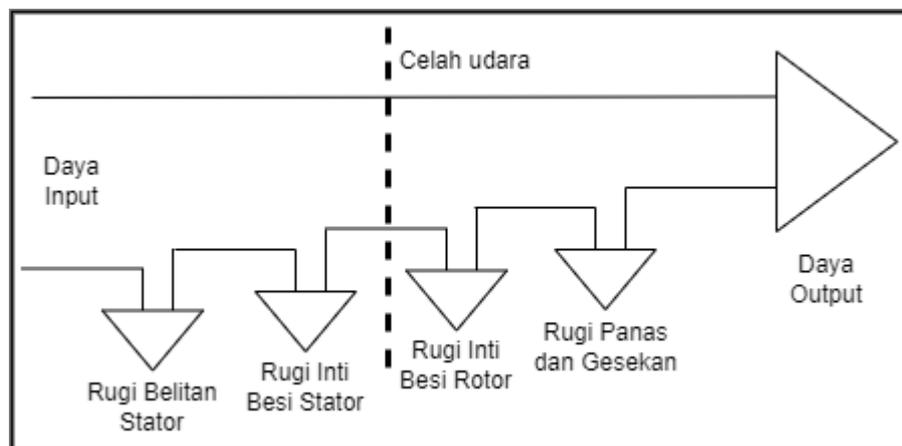
1. Pendahuluan

Kebutuhan dunia industri terhadap motor listrik semakin meningkat bersamaan dengan kemajuan teknologi pada bidang otomasi industri [1][2]. Banyak peralatan penunjang proses produksi kini diperankan oleh motor listrik. Sampai saat ini jenis motor induksi masih sangat diminati karena perawatan yang mudah dan ekonomis [1]. Industri yang semakin berkembang memerlukan jenis mesin yang lebih baik untuk menutupi kekurangan pada motor induksi. Salah satu pilihannya adalah *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) [3].

Motor sinkron adalah mesin yang dapat diterapkan pada banyak bidang karena kemampuannya untuk menyediakan fluks magnet tanpa adanya belitan serta memiliki kemudahan penerapan pada berbagai perangkat seperti peralatan elektro-mekanis serta aplikasi otomatisasi [4]. Dalam upaya mendapatkan ukuran yang praktis, daya keluaran, kepadatan torsi serta efisiensi PMSM banyak digunakan di mobil listrik [5][6]. Setelah kesuksesan Toyota Prius, motor sinkron dengan magnet bentuk pengaturan rotor "V" lebih disukai pada penggunaan kendaraan listrik, dimana komponen torsi sangat penting untuk operasi kecepatan tinggi [7].

PMSM menawarkan keuntungan efisiensi yang signifikan dibandingkan motor induksi ketika digunakan dalam kecepatan yang dapat dikontrol [5], [8], [9]. PMSM tidak memiliki nilai slip karena rotornya beroperasi dengan kecepatan sinkron [10]. Hal tersebut menjadi keunggulan PMSM dibandingkan motor induksi. Selain itu, karena sebagian besar eksitasi motor ini disediakan oleh magnet maka PMSM memiliki rugi-rugi yang lebih kecil terkait dengan komponen magnetisasi stator [11][12]. Faktor-faktor ini membuat PMSM menjadi alternatif dibandingkan motor induksi karena lebih efisien [13].

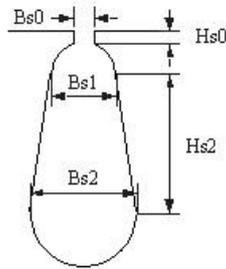
Dalam penggunaan motor listrik perlu diperhatikan tujuan pemakaian utama motor tersebut karena dengan mengoptimalkan desain motor listrik sesuai kebutuhan dapat mempengaruhi kinerja motor pada saat digunakan. Salah satu kebutuhan yang kerap kali diinginkan adalah daya (*ouput power*) dari motor listrik [13]. Daya adalah jumlah energi yang dihasilkan persatuan waktu [14]. Seperti yang diketahui motor listrik mengubah daya listrik menjadi daya mekanis melalui prinsip induksi magnet [1][15]. Melalui serangkaian fenomena yang terjadi pada prinsip kerja motor listrik, proses konversi daya listrik menjadi daya mekanis menghasilkan rugi-rugi daya yang digambarkan pada diagram berikut.



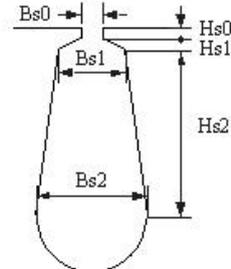
Gambar 1. Aliran daya motor listrik.

Untuk mencapai tujuan tersebut sebuah proses perancangan desain motor listrik dapat dilakukan melalui simulasi *software*. Simulasi *software* telah menjadi cara terbaru dalam bidang teknik untuk membuat bukti ilmiah tentang pengembangan, operasi, dan pemeliharaan, serta dapat mendukung ahli dalam pengambilan keputusan dalam penelitian [16]. Simulasi *Software* digunakan untuk karakterisasi, pemahaman, evaluasi, prediksi, kontrol, manajemen atau peningkatan melalui analisis kualitatif atau kuantitatif. Oleh karena itu penelitian ini penting dilakukan sebagai langkah perencanaan dalam mendesain sebuah motor listrik agar daya yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan penggunaan [17], [18].

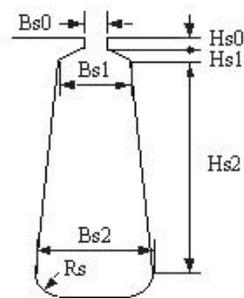
Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis daya keluaran pada motor listrik pada sebuah desain PMSM berbasis komputasional dengan *finite element analysis* (FEA). Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian pada konfigurasi terbaik penggunaan tipe slot pada bagian stator, maka empat jenis slot dibandingkan dalam penelitian ini [19], [20].



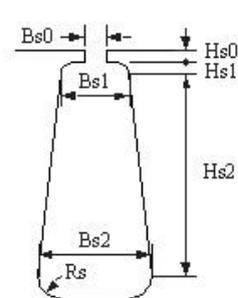
Gambar 2. Tipe slot C1.



Gambar 3. Tipe slot C2.



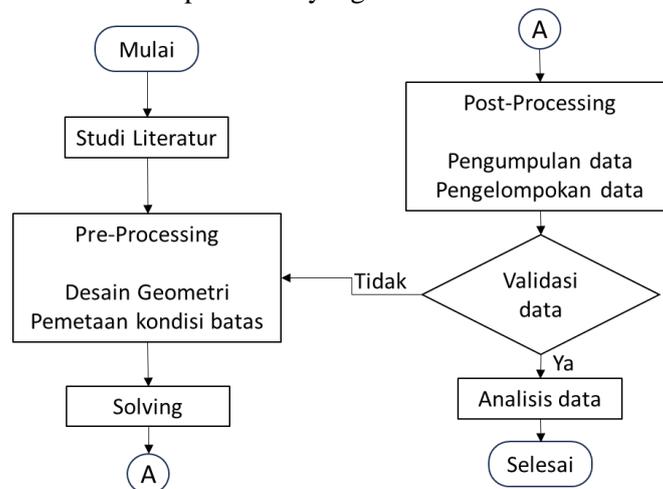
Gambar 4. Tipe slot C3.



Gambar 5. Tipe slot C4.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam empat tahap yang dimulai dengan pra-penelitian, pra-pengolahan, pemecahan dan pasca-pengolahan. Studi literatur pada tahap awal dilakukan untuk menentukan parameter PMSM. Kemudian penelitian ini dilakukan menggunakan metode FEA melalui software komputasi. Proses perancangan dan simulasi dilakukan dengan software Ansys Electronic 2018 menggunakan perangkat komputer dengan prosesor i3-10110U dan kartu grafis Intel UHD. Berikut ini adalah alur penelitian yang disusun dalam sebuah flowchart.



Gambar 6. Flowchart penelitian.

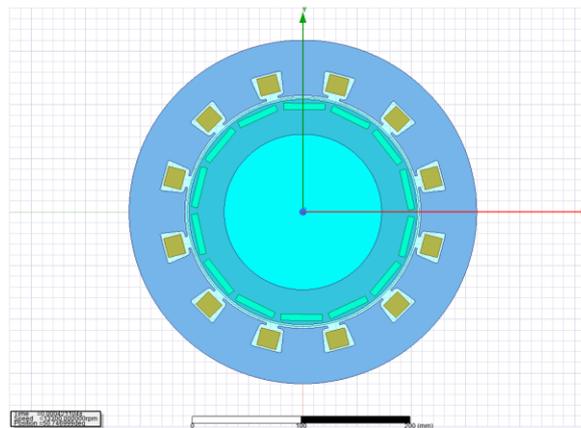
Pada penelitian ini, desain motor dilakukan dengan komputasi. Metode yang digunakan adalah FEA. Metode tersebut digunakan karena memiliki keunggulan dalam pemecahan kasus medan listrik serta medan magnet pada analisis motor sinkron [21]. Dengan menggunakan metode tersebut diharapkan dapat mempermudah analisis konstruksi desain awal motor sinkron yang berkaitan dengan medan magnet.

Motor sinkron yang akan didesain memiliki tipe *salient pole*. Secara konstruksi, jenis motor ini menggunakan belitan pada stator dan magnet permanen dibagian rotor untuk beroperasi [22]. Untuk melakukan desain awal, perlu diketahui nilai parameter desain motor agar dapat dibentuk batas geometrik pada *software*. Setelah memperoleh data desain, parameter dibuat menjadi desain geometrik pada *software* dengan memberikan batas numerik dan batasan medan magnet. Parameter desain PMSM ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter PMSM.

No.	Uraian	Unit
1	Diameter luar stator	320 mm
2	Diameter dalam stator	217 mm
3	Panjang stator	75 mm
4	Diameter luar rotor	210 mm
5	Diameter dalam rotor	145 mm
6	Panjang rotor	75 mm
7	Rugi daya (<i>friction</i>)	24 W
8	Rugi daya (<i>windage</i>)	0 W
9	Rugi daya (<i>heating</i>)	0 W
10	<i>Stacking factor</i>	0.95
11	<i>Reference speed</i>	13300 rpm

Analisis dilakukan dengan *software* Ansys Electronic 2018. Selain parameter pada tabel 1, PMSM ini menggunakan 14 magnet permanen pada rotornya dan menggunakan konfigurasi 12 kumparan stator. Setelah melalui beberapa tahapan desain maka didapatkan hasil desain pada Gambar 7.



Gambar 7. Desain motor sinkron.

Analisis menggunakan persamaan dasar elektromagnetik Maxwell. Persamaan tersebut digunakan untuk membentuk batas dan wilayah medan secara numerik. Berikut persamaan Maxwell yang akan digunakan: [23]

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \bullet D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \bullet B = 0. \quad (4)$$

Dimana:

H adalah intensitasi medan magnetik (A/m)

J adalah kerapatan arus listrik (A/m^2)

E adalah intensitas medan listrik (V/m)

D adalah kerapatan fluks listrik (As/m^2)

ρ adalah massa jenis elektron (As/m^3)

B adalah kerapatan medan magnet (T)

Setelah PMSM berhasil dioperasikan, selanjutnya dilakukan pengukuran pada parameter yang dianalisis, seperti arus *input* dan fluks magnet pada setiap fasa. Secara khusus penelitian ini melakukan pengukuran pada daya keluaran. Untuk menganalisis daya keluaran pada motor maka digunakan persamaan berikut:

$$P_{out} = \sqrt{3} V x I x \eta x \cos\varphi. \quad (5)$$

Dimana:

P_{out} : Daya keluaran (W)

V : Tegangan (V)

I : Arus (A)

η : Efisiensi (%)

$\cos \varphi$: Faktor daya

Atau dalam beberapa kondisi dapat diperoleh nilai daya suatu motor berdasarkan torsi yang dihasilkan, sesuai persamaan berikut:

$$P = T x \omega. \quad (6)$$

Dimana:

P : Daya keluaran (W)

T : Torsi (Nm)

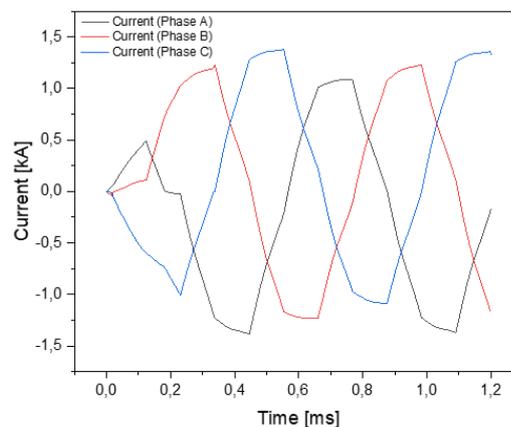
ω : Kecepatan sudut/angular (rad/s)

Setelah pengukuran dilakukan, data pengukuran diolah menjadi grafik untuk proses analisis. Kemudian pada tahap selanjutnya dilakukan analisis performa motor untuk dibandingkan dengan data empiris.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengukuran Arus Tiap Fasa

Setelah dilakukan pengukuran, didapatkan besar arus *input* pada setiap fasa. Berdasarkan hasil pengukuran arus *input* motor pada setiap fasa dapat dilihat pada Gambar 8, arus setiap fasa memiliki karakteristik yang sama pada setiap perubahan waktu. Ketiga fasa mencapai nilai puncak pada nilai hampir mendekati 1.5 kA.

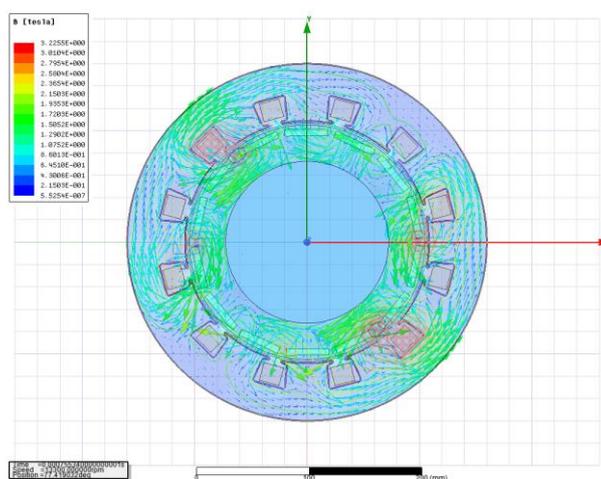


Gambar 8. Arus tiap fasa terukur.

Pada siklus sinusoidal yang ditunjukkan oleh Gambar 8 terdapat perbedaan pada awal siklus hingga perubahan waktu 0.2 detik, setelah itu arus kembali membentuk perubahan gelombang sinusoidal beraturan yang terjadi pada setiap fasa. Hal tersebut merupakan fenomena normal pada motor sinkron karena karakteristiknya yang menjaga kecepatan putaran motor yang dihasilkan. Hasil pengukuran ini menandakan bahwa arus pada motor berada dalam kondisi stabil dan tidak mengalami masalah pada susunan belitan atau bagian konstruksi stator.

3.2. Pengukuran Fluks Listrik

Analisis selanjutnya adalah pengukuran pada fluks listrik, hal ini dilakukan untuk memastikan kinerja arus *input* tidak bermasalah, maka dilakukan pengukuran besaran fluks listrik yang dilihat dari distribusi medan dan nilai terukurnya.



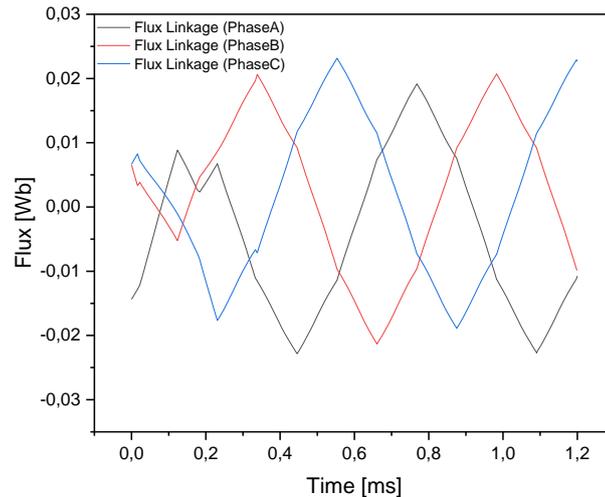
Gambar 9. Analisis fluks listrik.

Fluks yang dihasilkan dari desain konstruksi motor ini menghasilkan sebaran garis-garis gaya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada gambar tersebut indikator kerapatan fluks magnet digambarkan dengan rentang warna. Berdasarkan visualisasi tersebut, daerah fluks magnet yang memiliki nilai besar ditandai dengan warna merah, dimana daerah tersebut merupakan area yang menjadi tempat pertemuan kumparan stator dengan magnet permanen pada setiap putaran rotor.

Hal tersebut dapat terjadi karena adanya fenomena antara kumparan stator dengan magnet permanen pada rotor yang saling berinteraksi. Keberadaan dua sumber medan magnet pada konstruksi PMSM akan menghasilkan gaya tarik menarik yang besar ketika keduanya bertemu kemudian saling tolak-menolak saat keduanya bergerak menjauh mengikuti putaran rotor. Secara alami kedua sumber magnet tersebut akan memiliki nilai yang besar saat keduanya akan bertemu, kemudian akan menurun saat keduanya akan saling menjauh.

3.3. Pengukuran Fluks Magnet

Fluks magnet disetiap fasa diamati untuk memastikan motor dapat beroperasi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bahwa arus *input* pada motor mengalir pada belitan stator sehingga dapat menghasilkan garis-garis fluks magnet sesuai dengan visualisasi pada Gambar 9.



Gambar 10. Fluks magnet pada setiap fasa.

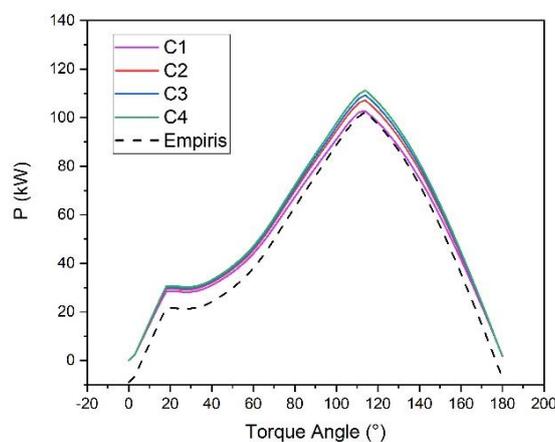
Pada dasarnya besarnya fluks magnet yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai arus *input* sehingga keduanya saling mempengaruhi performa sebuah motor listrik. Berikut ini adalah bentuk gelombang dari fluks magnet yang terbentuk pada setiap belitan fasa yang ditunjukkan pada Gambar 10. Gambar 10 menunjukkan bahwa setiap fasa menghasilkan fluks magnet yang identik dengan nilai maksimum 0.02 weber pada setiap puncak dan lembah gelombang sinusoidal. Artinya medan magnet yang timbul pada setiap belitan stator memiliki kekuatan yang identik sehingga dapat menghasilkan gaya magnet yang seragam pada motor sehingga motor dapat beroperasi.

Berdasarkan kedua indikator tersebut, dapat dikatakan bahwa keberadaan fluks magnet pada distribusi medan dan nilai arus *input* berada dalam kondisi stabil. Nilai fluks magnet yang stabil dan pengaruh konfigurasi arus *input* serta distribusi medan magnet yang terbentuk membuat motor ini mampu beroperasi pada kecepatan 13300 rpm dan menghasilkan torsi sebesar 164 Nm.

3.4. Pengukuran Daya Keluaran

Selanjutnya dilakukan pengukuran daya keluaran motor, dimana pada pengukuran ini akan dibandingkan antara daya keluaran dengan sudut torsi (*torque angle*) yang terbentuk setiap putaran motor. Berikut merupakan grafik hubungan daya keluaran dengan sudut torsi yang digambarkan pada Gambar 11.

Grafik pada Gambar 11 menggambarkan perbandingan masing-masing tipe slot (C) yang berbeda menghasilkan daya keluaran maksimum dengan karakteristik yang sama. Keempatnya memiliki nilai daya keluaran maksimum yang terjadi pada rentang sudut torsi 112° - 116° yaitu 102.7 kW (C1), 107.2 kW (C2), 109.3 kW (C3), dan 111.3 kW (C4).



Gambar 11. Daya keluaran.

Berdasarkan data empiris, daya keluaran pada motor memiliki nilai yang lebih rendah yaitu sebesar 102.3 kW dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan karakteristik yang sama pada bentuk perubahan gelombang sinusoidal. Perbedaan ini dapat terjadi karena faktor eksternal seperti lingkungan pengujian yang tidak dapat dipertimbangkan.

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa daya keluaran maksimum dicapai pada sudut torsi 114° dan terjadi penurunan hingga nol pada sudut 180° . Hal tersebut disebabkan oleh adanya konfigurasi sudut torsi yang mempengaruhi besar medan magnet pada setiap putaran rotor. Saat motor berputar, bagian rotor dan stator akan saling bertemu pada tiap putaran, sehingga ketika terbentuk sudut torsi yang sesuai maka akan menghasilkan gaya magnet yang besar dari interaksi tersebut. Hal itulah yang kemudian mempengaruhi besar nilai daya keluaran sebuah motor listrik.

Berdasarkan Tabel 2, desain PMSM ini memiliki hasil performa yang mampu mengalirkan daya input sebesar 114.2 kW menjadi daya keluaran sebesar 111.3 kW (pada konfigurasi C4) yang berarti motor ini memiliki efisiensi 97.5% dan rugi daya sebesar 2.9 kW.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa PMSM memiliki performa yang baik dengan acuan besar efisiensi sesuai dengan standar IEC 60034-30/31 [24].

Tabel 2. Hasil performa PMSM.

No.	Parameter	Nilai
1	Rugi daya total	2.9 kW
2	Daya masuk	114.2 kW
3	Daya keluar	111.3 kW (C4)
4	Efisiensi	97.5%
5	Kecepatan	13300 rpm
6	Torsi	164 Nm

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil karena telah mencapai tujuan dengan memperoleh serta menganalisis daya keluaran pada PMSM melalui metode komputasi. Hasil analisis dari penelitian ini diperoleh PMSM yang beroperasi dengan arus *input* sebesar 1.5kA pada setiap fasa sehingga dapat mengoperasikan motor pada kecepatan konstan 13300 rpm dengan memperoleh torsi sebesar 164 Nm. Nilai fluks magnet yang dihasilkan sebesar 0.02 Wb berada dalam kondisi stabil serta membentuk distribusi medan magnet yang merata pada setiap kumparan stator sehingga motor dapat beroperasi secara normal. Daya keluaran yang dihasilkan memiliki nilai rata-rata 107.6 kW yang muncul pada sudut 114° pada putaran rotor, yang berarti penelitian memiliki persentase kesalahan 5% dibandingkan dengan data empiris. Hasil analisis tersebut dapat menjadi acuan dalam langkah penelitian selanjutnya yaitu proses manufaktur PMSM.

Penelitian ini dapat menjadi referensi tambahan untuk proses perancangan motor listrik berbasis komputasi. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik dalam rancangan motor listrik tipe sinkron sehingga dapat membentuk desain motor listrik dengan daya keluaran yang sesuai dengan kebutuhan konsumen.

Referensi

- [1] P. Lumyong and P. Sarikprueck, "A Study on Induction Motor Efficiency Improvement for Implementing in Electric Vehicle," in 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, Oct. 2018, pp. 616–619. doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549478.
- [2] M. F. Rahman, L. Zhong, Md. E. Haque, and M. A. Rahman, "A direct torque-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drive without a speed sensor," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 1, pp. 17–22, Mar. 2003, doi: 10.1109/TEC.2002.805200.

- [3] T. A. Huynh and M.-F. Hsieh, "Comparative Study of PM-Assisted SynRM and IPMSM on Constant Power Speed Range for EV Applications," *IEEE Trans Magn*, vol. 53, no. 11, pp. 1–6, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2707125.
- [4] X. Qiu, W. Huang, and F. Bu, "Torque-angle-based direct torque control for interior permanent-magnet synchronous motor drivers in electric vehicles," *Journal of Power Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 964–974, 2013.
- [5] Y. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, "Design and Optimization of a Novel Dual-Rotor Hybrid PM Machine for Traction Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1762–1771, Feb. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2739686.
- [6] Y. Yang et al., "Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 86–97, Mar. 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2614972.
- [7] P. Ramesh and N. C. Lenin, "High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles—Comprehensive Review Based on Material Technology," *IEEE Trans Magn*, vol. 55, no. 11, pp. 1–21, Nov. 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2929145.
- [8] Y. Pranata, T. Arfianto, and N. Taryana, "Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Inverter 3 Fasa," *TELKA-Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 4, no. 2, pp. 91–102, 2018.
- [9] I. Wirama, I. Putra, I. Putra, A. A. N. M. Narottama, and A. A. N. G. Saptaka, "Kendali Kecepatan Motor Listrik Satu Fasa Berdasarkan Suhu Ruangan," *TELKA-Telekomunikasi Elektronika Komputasi dan Kontrol*, vol. 7, no. 1, pp. 21–28, 2021.
- [10] J. Julian, F. Wahyuni, L. M. Tua, and N. T. Bunga, "Analisis Motor Listrik Tipe Synchronous dengan Metode Komputasi," *Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, pp. 71–78, 2021.
- [11] Y. Xu, W. Zhang, Y. Huang, and J. Zou, "Reduction method of high-frequency audible PWM noise for three-phase permanent magnet synchronous motors," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1123–1129, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.066.
- [12] P. C. da Silva, D. dos Santos Matos, A. Nied, M. S. M. Cavalca, and J. de Oliveira, "Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model," *ISA Trans*, vol. 111, pp. 223–230, May 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2020.11.011.
- [13] T. Gundogdu and G. Komurgoz, "The Impact of the selection of permanent magnets on the design of permanent magnet machines—a case study: permanent magnet synchronous machine design with high efficiency," *Przełąd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 3a, pp. 103–108, 2013.
- [14] H.-J. Park and M.-S. Lim, "Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46677–46685, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907800.
- [15] M. Sumega, Š. Zoššák, P. Varecha, and P. Rafajdus, "Sources of torque ripple and their influence in BLDC motor drives," *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 519–526, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.075.
- [16] M. Felderer and G. H. Travassos, *Contemporary empirical methods in software engineering*. Springer, 2020.
- [17] Y. Guodong, Z. Jibin, X. Yongxiang, L. Yong, H. Jianhui, and W. Qian, "Torque Performance Improvement of a Radial-Flux Slotted Limited-Angle Torque Motor by

- Tapered Tooth-Tip,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 7, pp. 1–5, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2594807.
- [18] Y. Guodong, X. Yongxiang, Z. Jibin, and W. Guan, “Analysis and Experimental Validation of Dynamic Performance for Slotted Limited-Angle Torque Motor,” IEEE Trans Magn, vol. 53, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2702190.
- [19] Y. Guodong, Z. Jibin, X. Yongxiang, W. Qian, W. Baochao, and L. Junlong, “Estimation of Maximum Angular Operation Range for Permanent-Magnet Slotted Limited-Angle Torque Motor,” IEEE Trans Magn, vol. 51, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2441741.
- [20] G. Yu, Y. Xu, T. Lin, L. Xiao, J. Zou, and J. Tan, “Nonlinear EMC Modeling and Analysis of Permanent-Magnet Slotted Limited-Angle Torque Motor,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 9, pp. 8507–8518, Sep. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3014570.
- [21] Y. Xu, W. Zhang, Y. Huang, and J. Zou, “Reduction method of high-frequency audible PWM noise for three-phase permanent magnet synchronous motors,” Energy Reports, vol. 6, pp. 1123–1129, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.066.
- [22] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781420014235.
- [23] I. Maciejewski, M. Zlobinski, T. Krzyzynski, and S. Glowinski, “Vibration control of an active horizontal seat suspension with a permanent magnet synchronous motor,” J Sound Vib, vol. 488, p. 115655, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115655.
- [24] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, “Standards for Efficiency of Electric Motors,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 17, no. 1, pp. 12–19, Jan. 2011, doi: 10.1109/MIAS.2010.939427.