

ISSN 2087-3336 (Print) | 2721-4729 (Online)

TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika

Volume 10, Nomor 1, Januari 2023, hlm. 101-112

<http://jurnal.sttcileungsi.ac.id/index.php/tekno>

DOI: 10.37373

Pengaruh slot kumparan pada kinerja *permanent magnet synchronous motor* dengan metode komputasi

The effect of coil slot on permanent magnet synchronous motor performance with computational method

Ferdyanto^{1*}, Idris Marbawi¹, James Julian², Fitri Wahyuni²

^{1*} Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia, 12450

² Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia, 12450

^{1,2*} Jalan Limo Raya, Limo, Depok, Jawa Barat 16515

*Koresponden Email: ferdy@upnvj.ac.id

Artikel dikirim: 12/10/2022

Artikel direvisi: 02/12/2022

Artikel diterima: 05/12/2022

ABSTRAK

Kesadaran mengenai isu-isu energi dan lingkungan, industri otomotif mulai mengembangkan kendaraan listrik. Banyak negara dan produsen mobil besar telah banyak berinvestasi dalam penelitian kendaraan listrik. Di industri ada persyaratan dinamika torsi maksimum dan respon torsi kondisi tunak yang lebih baik. Ada gelombang yang lebih rendah pada fluks magnet motor dan torsi yang dihasilkan. *Permanent magnet synchronous motor* (PMSM) menjadi salah satu pilihan yang tepat. PMSM menggunakan *rare-earth magnets* yang telah diterapkan sebagai *traction motor* untuk kendaraan listrik karena memiliki efisiensi yang tinggi dan kepadatan daya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi yang disajikan dari berbagai jenis motor sinkron dengan spesifikasi motor yang berbeda dari *slot type of coil* untuk mengetahui motor sinkron mana yang lebih efisien. Sehingga penelitian ini dapat membantu para pengguna motor sinkron dalam menentukan rancangan motor sinkron yang sesuai dengan kebutuhan. Penelitian berjalan dengan menggunakan proses komputasi pada software Ansys Electronic 2018. Seluruh proses komputasi yang dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menyelesaikan permasalahan medan magnet dan medan listrik secara sederhana. Tipe motor dengan kode C1 memiliki nilai efisiensi tertinggi sebesar 95,251% berdasarkan rasio dari input power dan output power dengan spesifikasi besarnya nilai kuat medan magnet sebesar 0,93409 Tesla dan laju kuat arus persatuan panjang sebesar 5,3208 Ampere per meter, serta motor ini mendapatkan nilai efisiensi yang optimal pada kecepatan konstan motor sebesar 13300 rpm dan pada 75 derajat sudut putar rotor saat bekerja.

Kata Kunci: Efisiensi; *input power*; laju kuat arus listrik; medan magnet; *output power*.

ABSTRACT

Awareness of energy and environmental issues, the automotive industry began to develop electric vehicles. Many countries and major car manufacturers have invested heavily in electric vehicle research. In industry there is a requirement for maximum torque dynamics and better steady-state torque response. There is a lower wave in the motor's magnetic flux and the resulting torque. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is the right choice. PMSM uses rare-earth magnets which have been applied as traction motors for electric vehicles due to their high efficiency and power density. This research was conducted to determine the level of efficiency presented from various types of synchronous motors with different motor specifications from slot type of coil to find out which synchronous motor is more efficient. This research can help synchronous motor users in determining the synchronous motor design that suits their needs. The research using the computational process



TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi & Informatika is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

on the Ansys Electronic 2018 software. The entire computational process is carried out using the Finite Element Analysis (FEA) to solve simple magnetic and electric field problems. The motor type with code C1 has the highest efficiency value of 95.251% based on the ratio of input power and output power with specifications for the magnitude of the magnetic field strength of 0.93409 Tesla and the rate of current strength per unit length of 5.3208 Ampere per meter. PMSM gets the optimal efficiency value at a constant speed of the motor of 13300 rpm and at 75 degrees the rotational angle of the rotor while working.

Keywords: Efficiency, input power, rate of electric current, magnetic field, output power

1. PENDAHULUAN

Konsumsi minyak disektor industri otomotif telah meningkat dibandingkan sektor industri lainnya dalam beberapa dekade terakhir [1]. Khawatir pemanasan global dan kendala sumber daya energi pemerintah mulai memberlakukan peraturan yang lebih ketat untuk konsumsi bahan bakar dan emisi. Kesadaran mengenai isu-isu energi dan lingkungan, industri otomotif mulai mengembangkan kendaraan listrik. Banyak negara dan produsen mobil besar telah banyak berinvestasi dalam penelitian kendaraan listrik.

Traction motor system adalah salah satu komponen inti kendaraan listrik dan motor yang memiliki efisiensi tinggi dapat memaksimalkan penghematan energi kendaraan listrik [2], [3]. Saat ini jangkauan operasi, biaya produksi dan kemampuan akselerasi yang cepat telah menjadi masalah utama yang membatasi pengembangan kendaraan listrik. Pada kenyataannya teknologi motor dan penggerak yang efisien sebagian besar dapat meminimalisir kepadatan energi baterai yang rendah. Oleh karena itu, penggunaan motor dan sistem penggerak yang efisien merupakan komponen penting dalam pengembangan kendaraan listrik.

Di industri ada persyaratan dinamika torsi maksimum dan respon torsi kondisi tunak yang lebih baik. Telah ada riak yang lebih rendah pada fluks magnet motor dan torsi yang dihasilkan [4]. Beberapa penelitian telah mempelajari pengaruh slot stator untuk meningkatkan efisiensi dan torsi [5]–[7]. Slot stator semi tertutup banyak digunakan pada motor induksi spindel dengan nilai efisiensi yang optimal dan torsi maksimum karena slot tersebut menginduksi getaran dan kebisingan yang rendah [8].

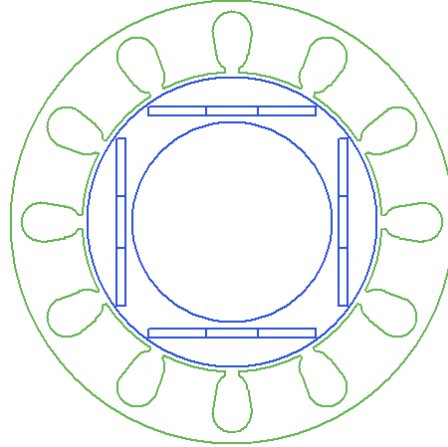
Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) menjadi salah satu pilihan yang tepat. PMSM menggunakan *rare-earth magnets* yang telah diterapkan sebagai *traction motor* untuk kendaraan listrik karena memiliki efisiensi yang tinggi dan kepadatan daya [9]–[11]. Untuk mendapatkan tingkat efisiensi yang tinggi maka motor sinkron yang digunakan sesuai dengan kebutuhan [12], [13]. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi yang disajikan dari berbagai jenis motor sinkron dengan spesifikasi motor yang berbeda dari *slot type of coil* agar mengetahui motor sinkron mana yang lebih efisien. Sehingga penelitian ini dapat membantu para pengguna motor sinkron dalam menentukan rancangan motor sinkron yang sesuai dengan kebutuhan.

2. METODE.

Tipe motor yang digunakan yaitu PMSM karena kekuatan, kekokohan, struktur sederhana, dan efektivitasnya yang unggul dalam industri [14], [15]. Konstruksi PMSM seperti halnya komponen yang ada pada motor induksi lainnya yaitu terdiri dari stator dan rotor. Pada bagian stator PMSM yang merupakan komponen statis terdapat kumparan yang diletakkan didalam stator [16], [17]. Saat pengoperasian motor maka medan magnet yang dihasilkan stator akan berputar dengan nilainya yang ekuivalen dengan frekuensi listrik didalam stator. Sedangkan pada bagian rotor terdapat magnet permanen yang posisinya tetap sehingga dapat memberikan gaya secara sinkron [18]. Selama pengoperasian motor, motor menghasilkan putaran medan magnet yang terinduksi secara tidak langsung yang diakibatkan oleh magnet dan kumparan yang ada [19]. Seperti yang terlihat pada gambar 1 yang merupakan salah satu desain motor dari beberapa tipe motor yang akan disimulasikan.



Penelitian berjalan dengan menggunakan proses komputasi pada software Ansys Electronic 2018. Metode yang digunakan selama tahapan komputasi menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengatasi masalah medan magnet dan medan listrik secara sederhana [20].



Gambar 1. Desain satu dimensi PMSM

Pada tabel 1 ditunjukkan parameter yang digunakan pada proses keseluruhan komputasi sebagai batasan kondisi yang ditentukan.

Tabel 1. Parameter motor

No.	Deskripsi	Nilai	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	Jumlah kumparan	12	
8	Kehilangan daya (friction)	24	w
9	Kehilangan daya (windage)	0	w
10	Kehilangan daya (heating)	0	w
11	<i>Stacking factor</i>	0.95	
12	<i>Reference speed</i>	13300	rpm

Secara menyeluruh semua proses menggunakan persamaan Maxwell sebagai acuan yang digunakan untuk penyelesaian area medan tertentu secara numerik [21]. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian dapat dilihat dari diagram alir pada gambar 2.

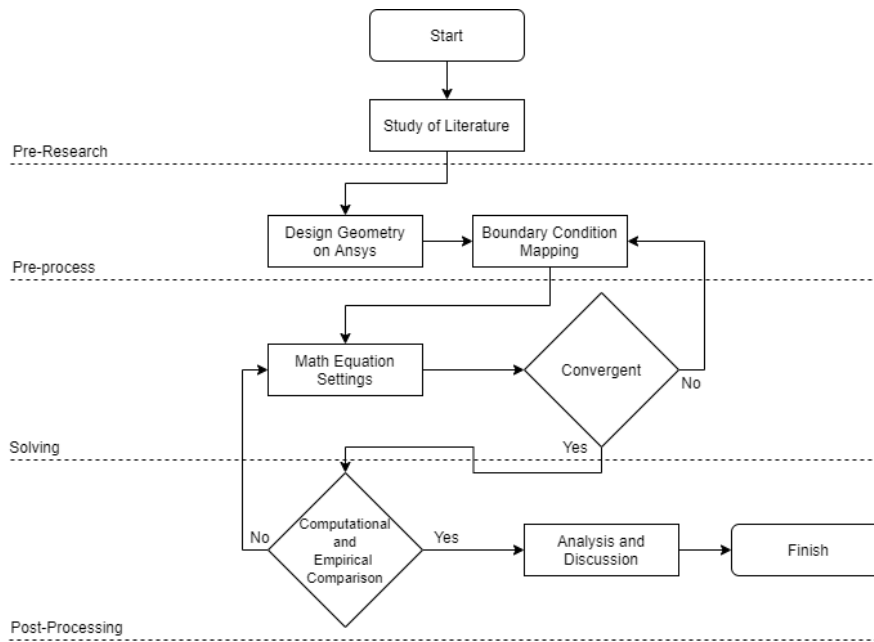
$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

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

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{3}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{4}$$

Dimana H adalah intensitas medan magnet (A/m), J rapat arus listrik (A/m²), E intensitas medan listrik (V/m), D rapat fluks listrik (As/m²), ρ rapat elektron (As/m³), B adalah rapat medan magnet (Tesla).

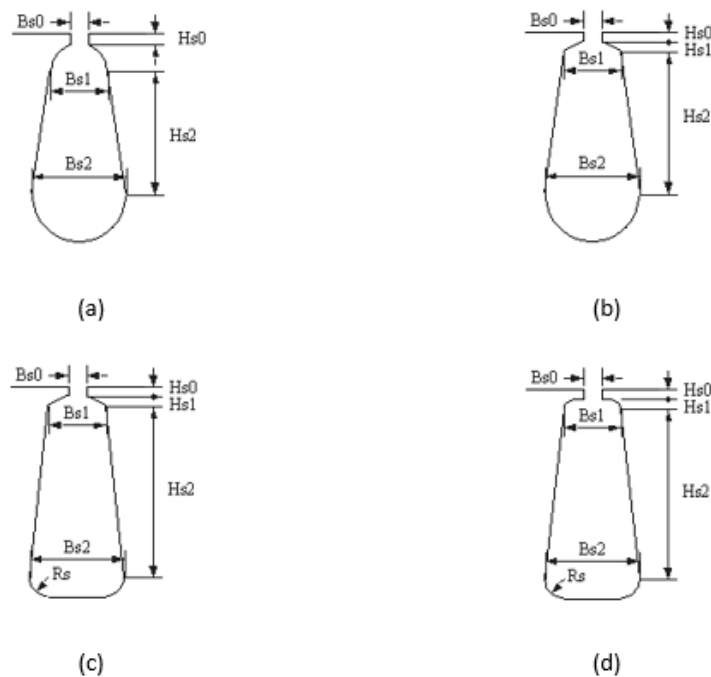


Gambar 2. Research flowchart

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

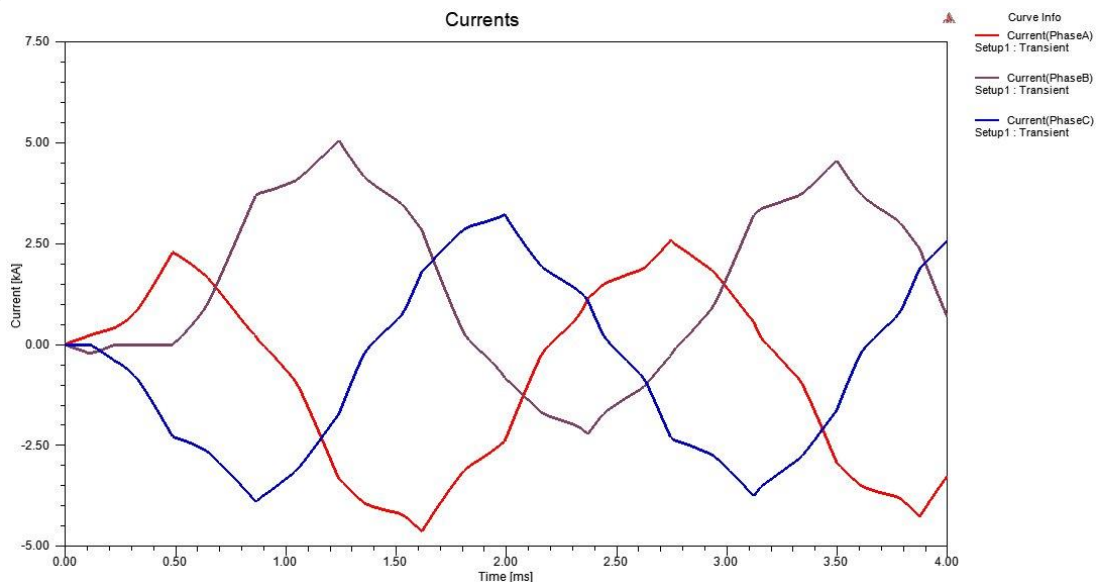
Dengan adanya beberapa batasan parameter yang telah di desain seperti pada tabel 1, konstruksi motor yang digunakan diklasifikasikan pada *slot type of coil* untuk jumlah magnet pada setiap kutubnya dan juga tipe kutub magnet yang digunakan ditetapkan sama yaitu berjumlah 4 magnet. Gambar 3 menunjukkan berbagai *slot type of coil* yang digunakan dan diklasifikasikan dalam beberapa tipe.

Pengaruh slot kumparan pada kinerja *permanent magnet synchronous motor* dengan metode komputasi



Gambar 3. (a) slot type of coil 1 C1; (b) slot type of coil 2 C2; (c) slot type of coil 3 C3; (d) slot type of coil 4 C4.

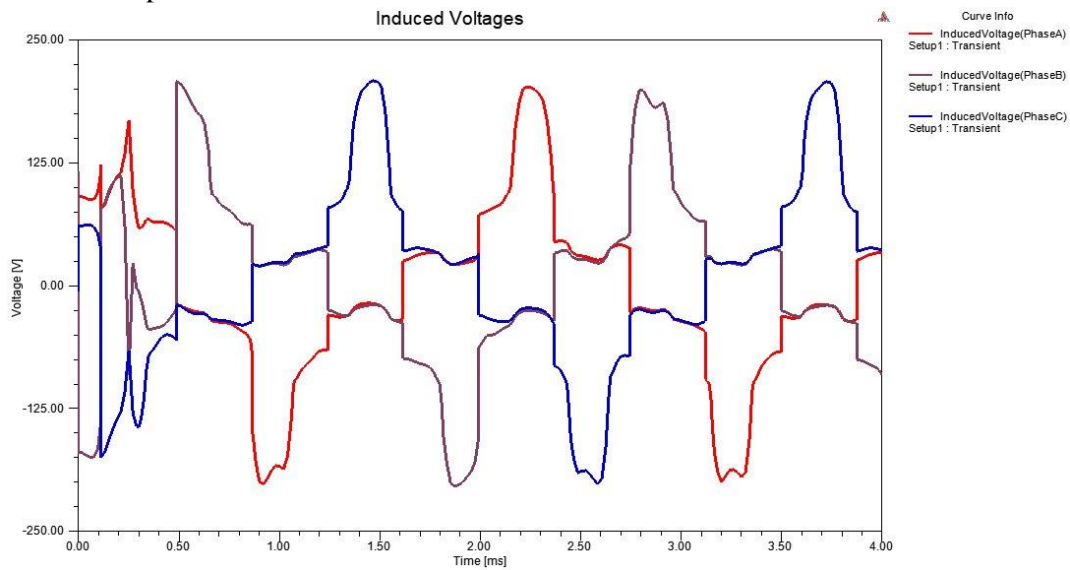
Perbedaan penggunaan *slot type of coil* bertujuan sebagai acuan dalam mengetahui tingkat efisiensi yang baik. Terlebih dahulu pengukuran diawali dengan menghitung percepatan kuat arus selama waktu yang ditetapkan. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui nilai kuat arus yang masuk pada masing-masing fasa. Gambar 4 menunjukkan hasil dari pengukuran kuat arus. Didapatkan laju kuat arus yang masuk pada masing-masing fasa adalah setimbang maka pembentukan medan magnet yang terbentuk akan konstan.



Gambar 4. Laju kuat arus pada masing-masing fasa

Telah diamati dari gambar 4 bahwa besaran arus yang diterima pada kumparan stator bernilai 5 kA. Terlihat awalnya kuat arus yang masuk kecil dan mulai konstan bentuk riak setiap fasanya pada waktu 1 ms. Besaran kuat arus yang ada telah memberikan putaran yang konstan dan terbentuknya

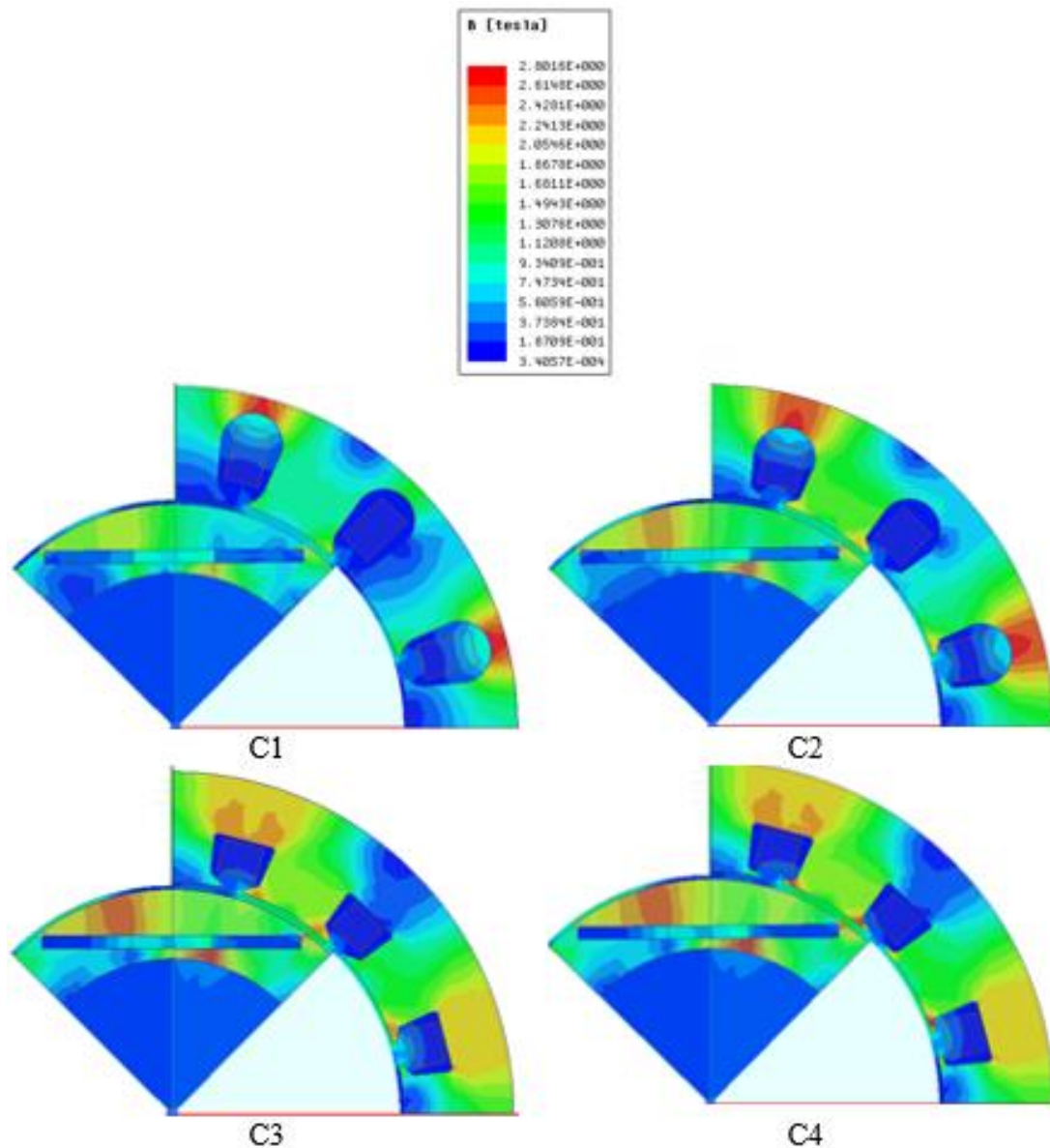
medan magnet yang stabil. Hal ini karena *output power* yang dihasilkan pada motor sinkron menjaga putaran motor tetap konstan.



Gambar 5. Perubahan laju tegangan pada setiap fasa

Pengukuran dilanjutkan pada pengukuran tegangan pada setiap fasanya. Tegangan rata-rata yang masuk pada PMSM bernilai 110 volt, dapat dilihat secara berkala tegangan yang terbentuk cenderung berubah-ubah dengan perubahan waktu disetiap perubahan laju gelombang. Terlihat pada gambar 5 yang menunjukkan besaran tegangan pada setiap fasanya.

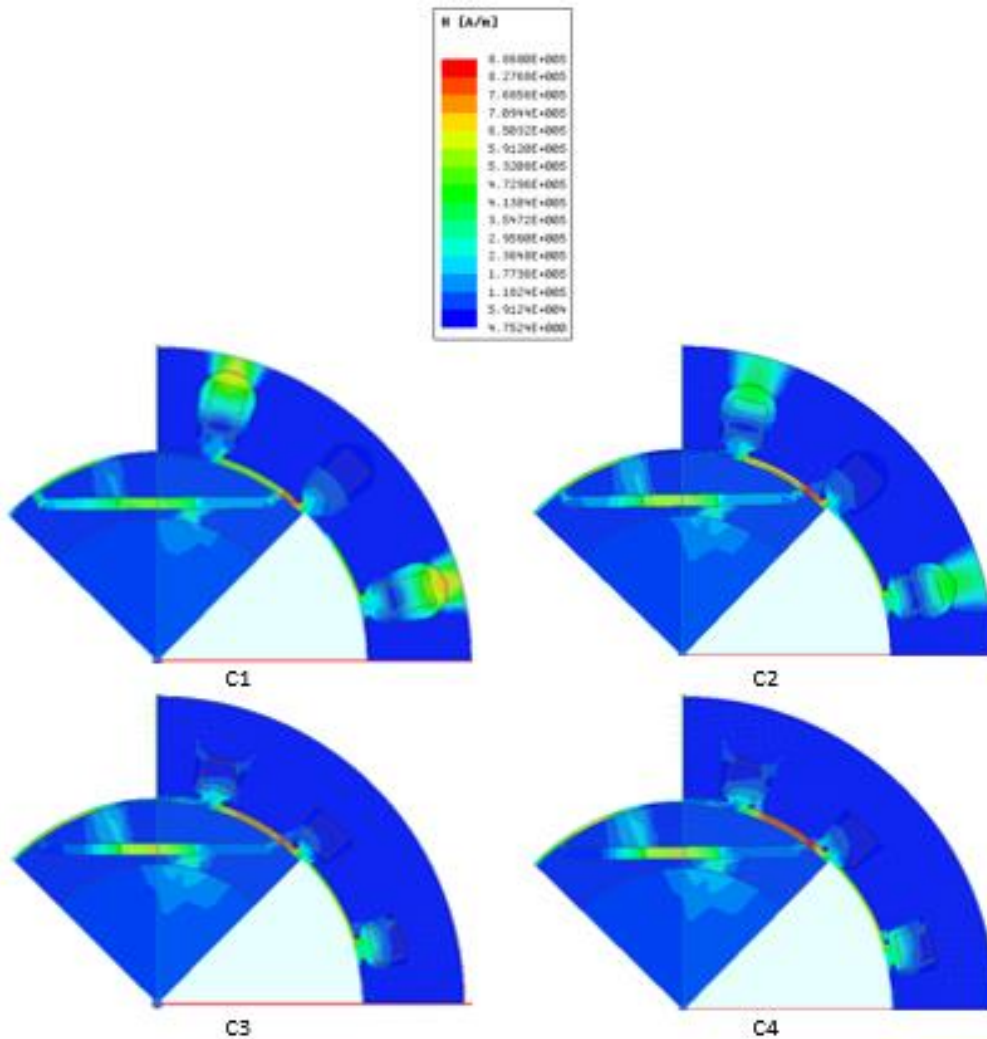
Gelombang yang dihasilkan pada gambar 5 sampai pada waktu 0.5 ms terlihat belum seragam sedangkan setelah waktu 0.5 ms terciptanya gelombang sinusoidal yang konstan di setiap perubahan waktunya. Terciptanya medan magnet dari *permanent magnet* dengan *coil* dapat menghasilkan fluks magnetik yang mengakibatkan terjadinya putaran medan magnet. Pada gambar 6 ditunjukkan perbedaan kontur dari medan magnet yang ada pada *slot type of coil* yang digunakan motor sinkron.



Gambar 6. Kontur medan magnet pada *slot type of coil* yang berbeda

Medan magnet yang tersebar diujung pertemuan rotor yaitu *permanent magnet* dan rumah kumparan pada stator dapat menyebabkan induksi medan magnet yang konstan dalam menghasilkan flux magnetik. Sebaran medan magnet dari *slot type of coil* yang berbeda pada motor sinkron terlihat jelas perbedaannya. Terutama pada C1 terhadap C2, C3 dan C4 yang terlihat lebih rendah nilainya menunjukkan nilai sebesar 0.93409 T. Jika dilihat secara seksama maka terdapat sebaran medan magnet yang sampai ke area luar stator tepatnya diujung kumparan stator. Medan magnet di area terluar diketahui adalah area kutub yang terkoneksi dengan masing-masing fasa yang mengakibatkan medan magnet yang berlebih.

Kecepatan kuat arus listrik persatuan panjang merupakan cara untuk menilai besarnya efek dari *electrical power* selama PMSM bekerja. Gambar 7 merupakan kecepatan kuat arus listrik persatuan panjang, dimana arus listrik terlihat pada saat *permanent magnet* dan *coil* pada posisi setimbang.



Gambar 7. Laju kuat arus listrik pada masing-masing *slot type of coil* yang berbeda

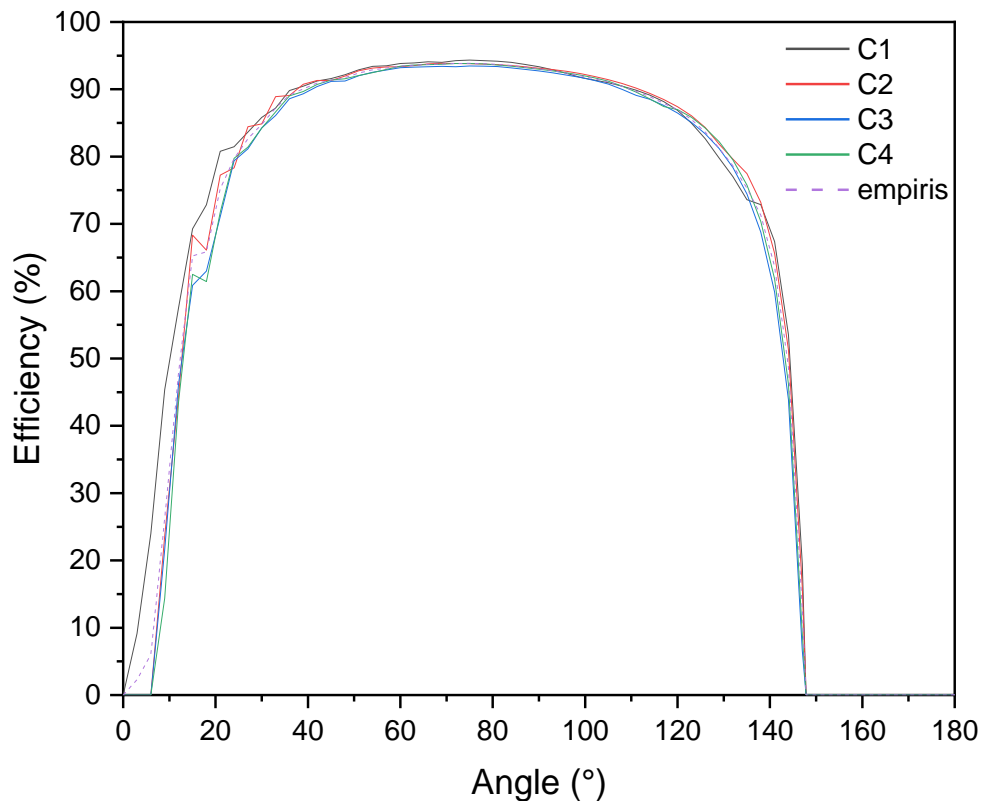
Induksi medan magnet saling mempengaruhi ketika magnet permanen sejajar dengan kumparan. Arus listrik di C1 terlihat lebih rendah dibandingkan di C2, C3, dan C4 dengan laju kuat arus listrik persatuan panjang 5,3208 Ampere per meter. Pada C1 juga terlihat adanya kelebihan arus listrik pada ujung kumparan stator, hal ini dikarenakan desain koil pada slot tipe C1 lebih melengkung dibandingkan *slot type of coil* yang lainnya. Tentunya semakin lebar kelengkungan kumparan stator bisa meningkatkan laju arus listrik.

Dari hasil yang diperoleh pada pengukuran pada Gambar 7 dan *input power* serta *output power* untuk setiap jenis slot kumparan yang digunakan pada PMSM dengan parameter yang sama, dapat dilihat bahwa beberapa parameter baru bekerja pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran laju kuat arus dan kuat medan magnet pada *slot type of coil* yang berbeda

Model	<i>slot type of coil 1</i>	<i>slot type of coil 2</i>	<i>slot type of coil 3</i>	<i>slot type of coil 4</i>
Kuat medan magnet (Tesla)	0.93409	1.1208	1.3076	1.3076
Laju perubahan kuat arus (A/m)	5.3208	6.5032	7.0944	7.6856
<i>Input Power</i> (W)	116.743	117.111	118.324	118.228
<i>Output Power</i> (W)	110.032	109.905	110.474	110.740
Efisiensi (%)	94,251	93,847	93,366	93,666

Efisiensi pada tabel 2 dihasilkan dari perbandingan antara *input power* serta *output power* pada masing-masing jenis slot kumparan. Selain itu dapat dilihat pada gambar 8 bahwa nilai efisiensi didasarkan pada sudut putar rotor yang bekerja sehingga jelas berapa derajat PMSM dapat menghasilkan nilai efisiensi yang paling optimal.



Gambar 8. Efisiensi berbagai *slot type of coil*

Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai efisiensi tertinggi terdapat pada sudut putaran rotor 75 derajat dengan nilai 94,34% terdapat pada kumparan *slot type of coil* 1. Dapat diukur nilai efisiensi yang dihasilkan dari data rasio *input power* dan *output power* dikatakan hampir sama dengan data yang disimulasikan untuk sudut putaran rotor PMSM. Pada sudut putar 147 derajat nilai efisiensi berada pada nilai nol sampai pada sudut putar 180 derajat.

4. SIMPULAN.

Jenis motor dengan *slot type of coil* 1 memiliki nilai efisiensi paling optimal sebesar 94,34% berdasarkan rasio *input power* dan *output power* dengan spesifikasi besaran kuat medan magnet sebesar 0,93409 Tesla dan laju kuat arus persatuan panjang sebesar 5,3208 Ampere per meter. PMSM ini mendapatkan nilai efisiensi yang paling optimal pada putaran motor konstan 13300 rpm dengan sudut putar 75 derajat pada rotor PMSM saat bekerja.

REFERENSI

- [1] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "Performance analysis of a PMSM drive for hybrid electric vehicles," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608285.
- [2] K. S. Cha, D. M. Kim, Y. H. Jung, and M. S. Lim, "Wound field synchronous motor with hybrid circuit for neighborhood electric vehicle traction improving fuel economy," *Appl. Energy*, vol. 263, no. September 2019, p. 114618, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114618.
- [3] G. Hong, T. Wei, and X. Ding, "Multi-Objective Optimal Design of Permanent Magnet

- Synchronous Motor for High Efficiency and High Dynamic Performance,” *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 23568–23581, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2828802.
- [4] S. G. Petkar, K. Eshwar, and V. K. Thippiripati, “A Modified Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 2, pp. 1025–1034, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2970671.
- [5] G. Cui *et al.*, “Optimization design of high efficiency variable frequency induction motor based on finite element analysis,” *2014 17th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2014*, pp. 701–705, 2014, doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013559.
- [6] G. Madescu, M. Greconici, M. Biriescu, and M. Moț, “Effects of stator slot magnetic wedges on the induction motor performances,” *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, pp. 489–492, 2012, doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231861.
- [7] C. G. Nistor, G. Scutaru, I. Peter, and O. I. Plesa, “Determination of magnetic noise for a 7.5 kW three-phase induction motor fed directly from the grid,” *2014 Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM 2014*, no. 1, pp. 431–436, 2014, doi: 10.1109/OPTIM.2014.6850929.
- [8] W. Purwanto, Risfendra, and D. S. Putra, “Effect of stator slot geometry on high speed spindle motor performance,” *2018 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICOIACT 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 561–565, 2018, doi: 10.1109/ICOIACT.2018.8350693.
- [9] E. Benfriha, A. Mansouri, A. Bendiabdellah, and M. Boufadene, “Nonlinear adaptive observer for sensorless passive control of permanent magnet synchronous motor,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 32, no. 8, pp. 510–517, 2020, doi: 10.1016/j.jksues.2019.06.003.
- [10] W. Jiang, S. Feng, Z. Zhang, J. Zhang, and Z. Zhang, “Study of Efficiency Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2847328.
- [11] 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.
- [12] J. Julian, F. Wahyuni, L. Mula Tua, and N. Toding Bunga, “Analisis Motor Listrik Tipe Synchronous dengan Metode Komputasi,” *J. Asimetrik J. Ilm. Rekayasa Inov.*, vol. 3, pp. 71–78, 2021, doi: 10.35814/asiimetrik.v3i1.1879.
- [13] X. Yan, F. Qin, J. Jia, Z. Zhang, X. Li, and Y. Sun, “Virtual synchronous motor based-control of Vienna rectifier,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 953–963, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.098.
- [14] R. Sitharthan, S. Krishnamoorthy, P. Sanjeevikumar, J. B. Holm-Nielsen, R. Raja Singh, and M. Rajesh, “Torque ripple minimization of PMSM using an adaptive Elman neural network-controlled feedback linearization-based direct torque control strategy,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12685.
- [15] M. A. Rahman and P. Zhou, “analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors,” *Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 256–267, 1996.
- [16] Y. Li, Y. Zhou, C. Zhao, and Y. Qin, “Dead-beat control of permanent magnet synchronous motor based on extended voltage vectors set,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1377–1382, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.018.
- [17] X. Li, L. Zhang, H. Ying, S. Huang, and Q. Zhang, “Study of suppression of vibration and noise of PMSM for electric vehicles,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 14, no. 7, pp. 1274–1282, 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0805.
- [18] S. Zhang, H. Zhang, C. Wang, and P. Ma, “Bursting oscillations and bifurcation mechanism in a permanent magnet synchronous motor system with external load perturbation,” *Chaos*,

Solitons and Fractals, vol. 141, p. 110355, 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2020.110355.

- [19] R. Ortega, B. Yi, S. Vukosavić, K. Nam, and J. Choi, “A globally exponentially stable position observer for interior permanent magnet synchronous motors,” *Automatica*, vol. 125, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.automatica.2020.109424.
- [20] 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, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.066.
- [21] 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, 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115655.