



Analisis Motor Listrik Tipe *Synchronous* dengan Metode Komputasi

Analysis of Synchronous Electric Motors with Computational Methods

James Julian^{1*}, Fitri Wahyuni¹, Lomo Mula Tua² dan Nely Toding Bunga³

¹Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia

²Sistem Informasi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Indonesia

Informasi artikel

Diterima:
13/01/2021
Direvisi:
19/01/2021
Disetujui:
20/01/2021

Abstract

In the current technological development, the electric motor is the most popular in various industrial applications. Electric motors today have evolved very quickly and have a significant impact on the lives of the wider community. The use of environmentally friendly and efficient energy is one of the reasons why this motorbike has become a pioneer of technological advances, especially in the automotive world. This research focuses on conducting a comprehensive analytical study on one type of electric motor, namely synchronous because it is widely applied in various conditions today. The analysis was carried out using a computational method by applying the finite element as a method of solving the magnetic field case involving Maxwell's equations and its impact on the torque generated in this synchronous motor. From the computation results, it is found that this synchronous motor does have a high torque when the magnetic field flux works constantly at 0.015 Wb. With an average torque generated by this synchronous motor of 1.5 kW.

Keywords: magnetic, synchronous, flux, torque.

Abstrak

Dalam perkembangan teknologi saat ini motor listrik menjadi salah primadona dalam berbagai terapan aplikasi industri. Motor listrik saat ini telah berevolusi dengan sangat cepat dan berdampak signifikan dalam kehidupan masyarakat luas. Penggunaan energi yang ramah lingkungan dan tepat guna menjadi salah satu alasan bagaimana motor ini menjadi pionir kemajuan teknologi khususnya dalam dunia otomotif. Penelitian ini berfokus untuk melakukan kajian analisis secara komprehensif pada salah satu jenis motor listrik yaitu sinkron karena banyak diterapkan dalam berbagai kondisi saat ini. Analisis yang dilakukan dengan menggunakan metode komputasi dengan menerapkan finite elemen sebagai metode pemecahan kasus medan magnet dengan melibatkan persamaan Maxwell dan dampaknya pada torsi yang dihasilkan pada motor sinkron ini. Dari hasil komputasi didapatkan bahwa motor sinkron ini memang memiliki torsi yang tinggi ketika flux medan magnet bekerja secara konstan sebesar 0,015 Wb. Dengan rata-rata torsi yang dihasilkan motor sinkron ini sebesar 1,5 kW.

Kata Kunci: magnet, sinkron, flux, torsi.

*Penulis Korespondensi. Tel: -; Handphone: +62 878 8343 9097
email : juliansiregar@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Motor yang bekerja pada kecepatan sinkron biasa disebut dengan *synchronous motor* (Yang dkk, 2020). Secara umum kecepatan sinkron dalam *synchronous motor* adalah suatu kecepatan konstan dimana motor menghasilkan gaya gerak listrik yang merupakan hasil perubahan dari energi listrik menjadi energi mekanik (Cha dkk, 2020). Motor sinkron memerlukan arus searah atau bisa dikenal dengan *Direct Current* (DC) untuk membangkitkan daya dan memiliki keistimewaan pada *torque* awal yang cukup rendah (Sridhar, 2020). Penggunaan dan penerapan aplikasi motor sinkron ini sudah banyak diterapkan seperti pada kompresor udara sederhana, *generator motor* dan *submersible pump* (Nakamura dkk, 2020).

Kecepatan motor sinkron ketika bekerja memiliki kecepatan yang lebih rendah dari kecepatan medan magnet yang berputar pada statornya (da Silva dkk, 2020), ini menyebabkan pengendalian kecepatan menjadi lebih sederhana dan *powerfull* (Li, Qin, dkk, 2020). Secara kontruksi dasar, motor sinkron merupakan jenis motor listrik yang paling sederhana dibandingkan dengan motor listrik lainnya (Chen dkk, 2020). Motor sinkron ini termasuk kedalam jenis motor yang populer digunakan karena pada rotornya tidak terhubung dengan listrik dan paling efisien diantara motor konvensional yang ada saat ini (Xu dkk, 2020).

Penggunaan motor sinkron yang sesuai akan memberikan efisiensi penggunaan yang lebih baik (Yan dkk, 2020). Akan tetapi banyak pengguna motor ini tidak dapat menentukan kategori motor sinkron yang tepat dan sesuai dengan beban kerja yang akan digunakan nantinya. Pada penelitian ini menitikberatkan pada mengetahui cara menentukan spesifikasi motor sinkron yang sesuai dan tepat agar penerapan motor sinkron ini menjadi lebih efektif dan efisien.

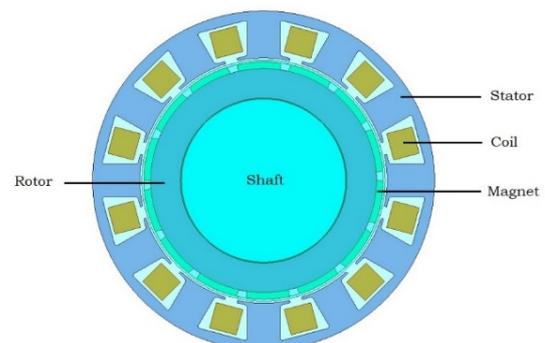
Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sebaran medan magnet yang terjadi selama motor sinkron bekerja dimana kondisi tersebut akan sudah diperhitungkan baik secara langsung atau tidak langsung. Sebaran medan magnet ini

akan digunakan untuk memprediksi besaran torsi motor sinkron yang akan dibandingkan dengan torsi secara empiris. Dimana kegiatan penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dalam merancang motor sinkron yang sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan oleh para pengguna motor sinkron.

2. METODOLOGI

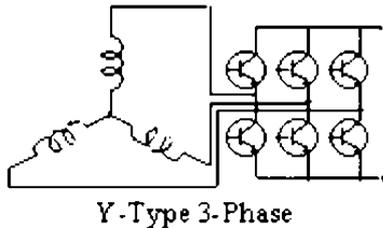
Motor sinkron yang dipilih adalah tipe *salient pole* karena tipe ini merupakan motor sinkron yang paling umum digunakan dalam industri. Motor sinkron ini terdiri dari beberapa kumparan dan magnet yang digunakan untuk melakukan proses induksi selama motor bekerja (Ortega dkk, 2021). Kumparan dan magnet tersebut menghasilkan putaran medan magnet yang menyebabkan medan magnet rotor tidak terinduksi secara langsung. Magnet biasanya terletak dibagian rotor, yang dapat berupa magnet permanen atau magnet dari pembentuk arus DC (Krishnan, 2017).

Posisi magnet akan dibuat terkunci atau tetap pada lokasinya agar dapat menyalurkan gaya pada rotor secara bersamaan (Zhang dkk, 2020). Sedangkan untuk kumparan diletakkan didalam stator. Bagian stator ini merupakan bagian motor yang selalu diam dalam skema kerja motor sinkron (Li dkk, 2020). Ketika motor bekerja stator ini akan menghasilkan medan magnet yang berputar atau berotasi yang nilai putarannya sebanding dengan frekuensi listrik yang dimasukkan langsung kedalam stator. Untuk lebih mudah memahami dapat dilihat pada skema motor sinkron yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Skema motor sinkron

Pada penelitian ini motor sinkron yang digunakan sepenuhnya menggunakan aliran arus DC dengan konfigurasi jenis tipe Y atau tipe tiga fasa. Tipe ini dipilih karena dapat menghasilkan putaran yang tinggi dan memiliki hasil torsi yang besar (Benfriha dkk, 2019). Untuk memahami bentuk diagram wiring yang digunakan dapat ditunjukkan seperti yang ada pada gambar 2.



Gambar 2. Wiring diagram motor sinkron

Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menentukan besaran torsi yang dihasilkan dari rancangan motor sinkron yang telah disepakati. Dimana pengukuran torsi akan mengikuti persamaan berikut (Krishnan, 2017):

$$T = k \phi I \quad (1)$$

dimana:

T adalah torsi yang dihasilkan oleh motor (Nm)

k adalah konstanta konversi

ϕ adalah *flux magnetic* yang dihasilkan motor (Wb)

I adalah kuat arus listrik yang masuk ke dalam motor (A)

Dalam melakukan analisis, semua proses komputasi dilakukan dengan menggunakan software Ansys Electronic 2018. Beberapa parameter atau variable dimasukkan ke dalam kondisi batas agar seluruh persamaan dasar komputasi dilakukan seperti yang ditunjukkan pada tabel 1.

Proses komputasi yang dilakukan seluruhnya menggunakan metode finite elemen analisis (FEA). Metode FEA dipilih karena dianggap dapat menyelesaikan kasus medan listrik dan medan magnet secara praktis (Y. Xu dkk, 2020). Secara keseluruhan proses penyelesaian kasus akan melibatkan

beberapa persamaan dasar elektromagnetik yang biasa disebut dengan persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell digunakan secara spesifik untuk menyelesaikan kondisi batas dan wilayah medan tertentu secara numerik.

Tabel 1. Parameter model komputasi

No	Uraian	Unit
1	Jumlah pole dalam motor induksi	14
2	Kehilangan daya fraksi	24 W
3	Diameter luar stator	300 mm
4	Diameter dalam stator	217 mm
5	Panjang stator	75 mm
6	Jumlah kumparan	12
7	Diameter luar rotor	210 mm
8	Diameter dalam rotor	145 mm
9	Panjang rotor	75 m

Persamaan Maxwell yang digunakan adalah sebagai berikut (Maciejewski dkk, 2020):

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

dimana:

H adalah Intensitas medan magnetik (A/m)

J adalah Kerapatan kuat arus listrik (A/ m²)

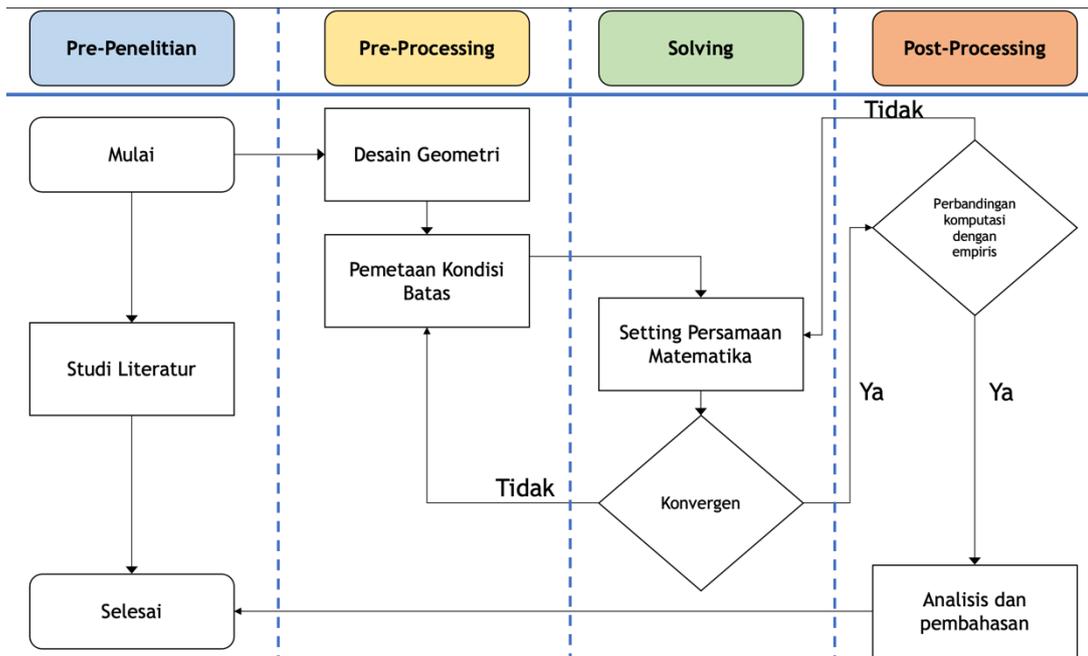
E adalah intensitas medan listrik (V/m)

D adalah kerapatan flux listrik (As/m²)

ρ adalah massa jenis electron (As/m³)

B adalah kerapatan medan magnet (Tesla)

Seluruh kegiatan penelitian ini mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Kegiatan penelitian terbagi menjadi empat kategori yaitu pra penelitian, pra proesing, solving dan post proesing. Semua kegiatan dilakukan secara simultan sesuai dengan pemetaannya masing-masing.

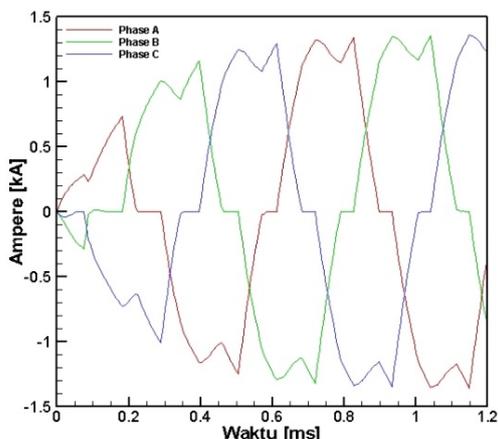


Gambar 3. Diagram alir penelitian

Kegiatan komputasi ini dilakukan dengan menggunakan komputer yang ditenagai intel core i7 dengan total core 4 cores 8 threads.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran awal dilakukan dengan mengukur laju perubahan arus sepanjang waktu yang ditentukan. Hal ini perlu dilakukan untuk mendapatkan kualitas arus yang masuk sesuai atau seimbang pada setiap fasanya. Hasil pengukuran arus seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Dapat dilihat disana setiap fasa mendapatkan arus yang hamper seragam eksistansinya.



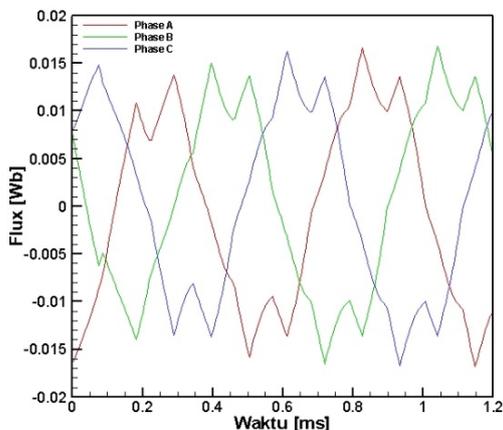
Gambar 4. Pengukuran kuat arus pada setiap fasanya

Dengan demikian pembentuk medan magnet yang terjadi akan berlangsung secara konstan dan baik. Jika diamati lebih seksama besaran arus yang diterima oleh kumparan pada stator akan sebesar 1,5 kA. Besaran arus ini akan menjamin medan magnet yang terbentuk akan stabil dan menghasilkan putaran yang konstan. Pada awalnya arus yang masuk akan terlihat kecil, itu disebabkan karena motor sinkron ini lebih menjaga putaran motor yang dihasilkan dari pada daya motor tersebut.

Setelah pengukuran arus listrik dilakukan untuk setiap fasanya kemudian pengukuran dilanjutkan untuk mengukur laju medan magnet yang terbentuk dalam bentuk flux medan magnet. Hasil pengukuran flux medan magnet seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. Dapat dilihat dari gambar tersebut medan magnet yang terbentuk pada setiap fasanya membentuk trend yang seragam. Ini berarti pembentukan medan magnet pada setiap polanya memiliki kekuatan yang sama atau seragam. Flux medan magnet ini haruslah seragam pada setiap polanya karena medan magnet inilah yang memastikan putaran sinkron akan terjadi pada rotor.

Jika flux medan magnet terjadi besaran yang berbeda tentu akan berakibat pada putaran menjadi tidak stabil dan mengalami

perubahan setiap waktunya. Oleh karena ini menjaga besaran flux medan magnet menjadi suatu tantangan tersendiri dalam pengoperasian motor sinkron ini. Dengan kuat arus sebesar 1,5 kA dapat dilihat besaran flux medan magnet dapat menghasilkan maksimum sebesar 0,015 Wb.



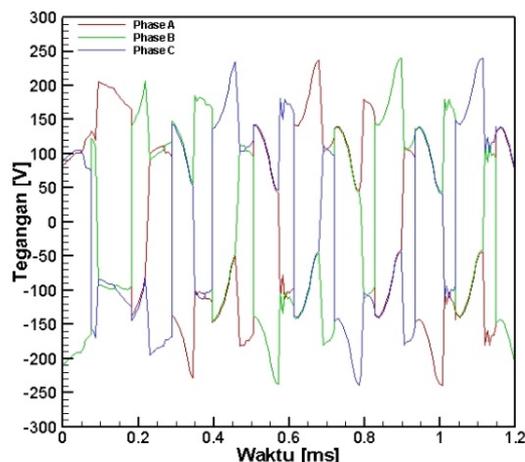
Gambar 5. Pengukuran Flux medan magnet pada setiap fasanya

Pada dasarnya untuk meningkatkan flux medan magnet tentu saja dipengaruhi oleh kuat arus listrik yang disuplai kedalam motor listrik. Kuat arus ini memiliki kubungan yang liner dengan flux medan magnet, oleh karena itu semakin besar kuat arus listrik akan berdampak pada semakin besar juga flux medan magnet yang terbentuk. Pengaruh lain yang berperan dalam kuat tidaknya medan magnet adalah hambatan yang terjadi didalam kumparan.

Lilitan kumparan atau kumparan ini berperan dalam meningkatkan kuat medan magnet itu sendiri. Semakin kecil hambatan yang terbentuk maka semakin besar juga medan magnet yang akan terbentuk. Dengan demikian arus dan hambatan memiliki peran yang sangat signifikan dalam mempertahankan laju perubahan flux medan magnet yang akan terproduksi. Akan tetapi jika itu tentu berbanding terbalik dengan tegangan yang masuk kedalam motor sinkron ini.

Tegangan yang masuk kedalam motor ini tentu saja merupakan jenis motor DC dengan besaran sebesar 110 (volt), dapat dilihat dari hasil pengukuran tegangan yang dilakukan disetiap fasanya seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Secara rata-rata tegangan

yang masuk kedalam motor adalah sebesar 110 (volt) akan tetapi tegangan yang terbentuk sangat fluktuatif dan cenderung berubah-ubah seiring dengan perubahan waktunya.



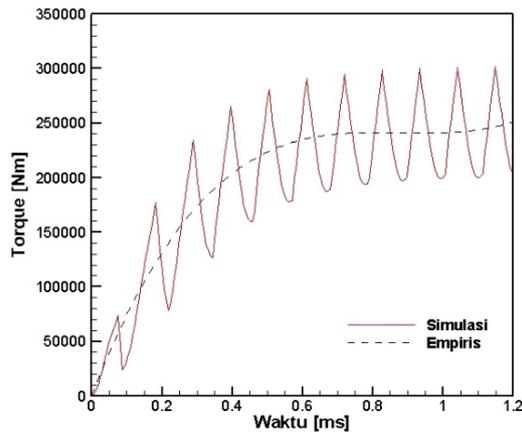
Gambar 6. Pengukuran tegangan pada setiap fasa motor sinkron

Ini menunjukkan bahwa tegangan yang masuk dalam motor tidak dipertahankan untuk menjaga kuat arus listrik tetap stabil dalam memproduksi flux medan listrik yang stabil dan merata. Hal ini memang menjadi karesteristik tersendiri untuk motor sinkron ini. Yang perlu dijaga dalam motor skintron ini terhadap tegangan yang masuk adalah maksimum tegangan yang bekerja. Karena tegangan yang berlebih akan menyebabkan kumparan akan mengalami degradasi dalam memproduksi medan magnet.

Dari gambar 6 juga bisa dilihat tegangan yang masuk pada setiap fasanya memiliki kecenderungan yang masih cukup seragam, atau trend yang hampir serupa walaupun tidak berlaku setiap perubahan waktunya. Perbedaan ini dikarenakan pengaruh dari medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen yang ada pada stator. Medan magnet permanen tersebut menginduksi flux medan magnet yang menyebabkan terjadi putaran medan magnet antara kumparan dengan magnet permanen.

Dari hasil pengukuran didapatkan besaran torsi yang dihasilkan motor sinkron sebesar 250 kNm. Torsi ini dihasilkan konstan setelah motor berputar selama satu detik dari putaran awalnya. Nilai torsi yang dihasilkan persatuan waktu dapat dilihat

seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Pada awal perputaran rotor dapat dilihat torsi yang dihasilkan tidak terlalu besar, akan tetapi seiring flux medan magnet dapat bekerja secara stabil dapat dilihat torsi yang dihasilkan cenderung stabil.



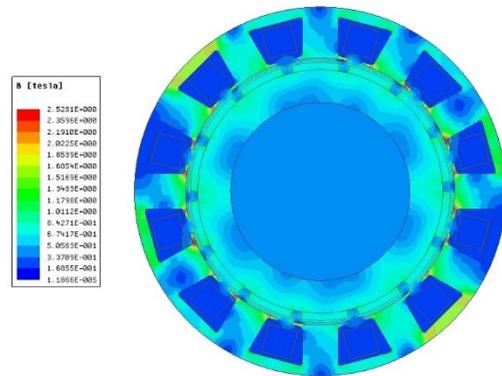
Gambar 7. Torsi motor sinkron simulasi vs analitik

Torsi maksimum yang dihasilkan oleh motor ini adalah sebesar 300kNm. Torsi maksimum ini didapat Ketika putaran magnet permanet telah melewati komparan-kumparan yang dipasang dalam stator. Semakin dekan kutub magnet permanet dengan kumparan maka akan semakin besar juga tolakan putaran yang akan terjadi. Begitu juga sebaliknya torsi minimum didapat Ketika magnet permanet sudah bergerak menjauh dari kumparan atau tepat atau sejajar dengan kumparan tersebut.

Secara akumulatif torsi yang dihasilkan juga menunjukkan bahwa motor sinkron ini bekerja sesuai dengan karekteristik dasarnya yaitu memiliki torsi kecil diawal dan torsi yang koston sepanjang waktu. Perubahan naik dan turun torsi itu dipengaruhi oleh posisi mangnet permanen dengan kumparannya, untuk memperkecil perubahan tersebut bisa di rekayasa dengan memperbanyak magnet permanet pada rotor atau memperbanyak kumparan pada setiap polenya. Semakin banyak kondisi pertemuan antar magnet permanen dengan kumparan makan akan semakin kuat putaran terjadi dan dipertahankan.

Perputaran rotor yang dihasilkan sebagai bentuk motor sinkron bekerja tentu saja

dihasilkan dari produksi medan magnet baik dari magnet permanet dengan kumparannya. Semakin kuat medan magnet yang terbentuk semakin besar flux medan magnet yang terjadi. Untuk memahami lebih dalam sebaran medan magnet yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Sebaran kontur medan magnet

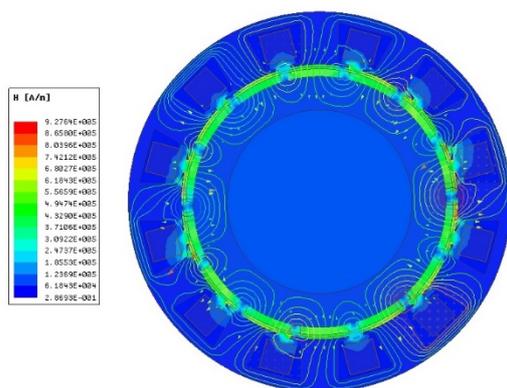
Kuat medan magnet dapat ditemukan diujung pertemuan staor yang terdapat kumparan dengan magnet permanennya. Itu menunjukkan bahwa setiap pertemuan antara magnet permanen dan rumah kumparan akan memberikan induksi medan magnet yang terbaik dalam menghasil flux medan magnet. Tetapi jika dilihat lebih lanjut sebaran medan magnet terlihat sangat menonjol pada beberapa kumparan. Itu terlihat dari beberapa kumparan yang menghasilkan medan magnet sampai daerah terluar statornya.

Derah medan magnet yang terlihat sampai daerah terluar itu adalah daerah pole yang terhubung dengan setiap fasanya, oleh karena itu akan terdapat beberapa kumparan yang dapat menghasilkan medan magnet berlebih karena merupakan daerah polarisasi medan magnet.

Daerah magnet permanen jika terbentuk pada gambar 8, juga menunjukkan besaran medan magnet yang bernilai konstan sebesar 1,1798 Tesla. Itu karena magnet permanen akan menghasilkan medan magnet yang selalu bernilai konstan terhadap waktu.

Laju perubahan kuat arus listrik persatuan panjang merupak salah satu cara untuk mengetahui sebesapa besar pengaruh kuat listrik yang menginduksi kumparan selama motor sinkron bekerja.

Laju perubahan kuat arus listrik persatuan panjang dapat dilihat seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9. Dari gambar 9 dapat dilihat daerah terbesar kuat arus listrik adalah Ketika magnet permanen dan kumparan berada dalam posisi sejajar atau parallel. Disana induksi medan magnet bekerja dan saling mempengaruhi satu dengan yang lain. Semakin lebar kelengkungan stator tentu akan meningkatkan jalur kuat arus listrik bekerja. Akan tetapi jika kelengkungan stator semakin besar tentu saja akan berdampak pada ukuran motor semakin besar dan kumparan yang digunakan akan semakin banyak sehingga kurang ekonomis dan efisien.



Gambar 9. Laju perubahan kuat arus listrik persatuan panjang

Dalam gambar 9 juga dapat dilihat arah vektor arus listrik yang bergerak dalam lintasan medan magnet. Arus listrik akan bergeak menuju magnet permanen Ketika kumparan dan magnet dalam kondisi sejajar.

4. SIMPULAN

Motor sinkron yang dianalisis dalam penelitian ini dapat bekerja dengan baik jika beberapa parameter dapat bekerja dengan baik, parameter yang dihasilkan yaitu:

- Kuat arus listrik yang dihasilkan untuk menjalankan setiap fasanya sebesar 1,5 kA
- Flux medan magnet yang dihasilkan pada setiap fasanya sebesar 0,015 Wb.
- Dengan kecepatan motor sinkron dijaga konstan sebesar 13300 rpm maka torsi yang dihasilkan adalah sebesar 250 kNm.

Dengan demikian motor sinkron yang bekerja dengan kondisi parameter yang dihasilkan tersebut dapat bekerja dengan baik karena sebaran induksi medan magnet yang terbentuk secara merata dan laju perubahan kuat listrik sebesar 5 Amper/ m disetiap kelengkungan dalam stator pada motor sinkron ini. Jika dibandingkan dengan persamaan empirisnya maka torsi yang dihasilkan oleh perhitungan komputasi memiliki *uncertainty* sebesar 95%. Oleh karena itu analisis dengan komputasi ini dapat dikatakan sebagai hasil perhitungan yang baik karena memiliki eror perhitungan sebesar 5% terhadap hasil empirisnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Benfriha, E. dkk. (2019) 'Nonlinear adaptive observer for sensorless passive control of permanent magnet synchronous motor', *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. Elsevier.
- Cha, K.-S. dkk. (2020) 'Wound field synchronous motor with hybrid circuit for neighborhood electric vehicle traction improving fuel economy', *Applied Energy*. Elsevier, 263, p. 114618.
- Chen, L. dkk. (2020) 'A variable-order fractional proportional-integral controller and its application to a permanent magnet synchronous motor', *Alexandria Engineering Journal*. Elsevier, 59(5), pp. 3247-3254.
- Krishnan, R. (2017) *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC press.
- Li, Y., Zhou, Y., dkk. (2020) 'Dead-beat control of permanent magnet synchronous motor based on extended voltage vectors set', *Energy Reports*. Elsevier, 6, pp. 1377-1382.
- Li, Y., Qin, Y., dkk. (2020) 'Model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor based on dynamic finite-control-set using fuzzy control', *Energy Reports*. Elsevier, 6, pp. 128-133.
- Maciejewski, I. dkk. (2020) 'Vibration control of an active horizontal seat suspension with a permanent magnet synchronous motor', *Journal of Sound and Vibration*. Elsevier, 488, p. 115655.
- Nakamura, T. dkk. (2020) 'Quantitative characterization of nonlinear impedance and load characteristic of 50-kW-class fully superconducting induction/synchronous motor', *Physica C: Superconductivity and its*

- Applications*. Elsevier, 578, p. 1353662.
- Ortega, R. dkk. (2021) 'A globally exponentially stable position observer for interior permanent magnet synchronous motors', *Automatica*. Elsevier, 125, p. 109424.
- da Silva, P. C. dkk. (2020) 'Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model', *ISA transactions*. Elsevier.
- Sridhar, C. (2020) 'Fault diagnosis of three-phase electrically-excited synchronous motor by using adaptive threshold algorithm', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier.
- Xu, J. dkk. (2020) 'A new type of sinusoidal suspension winding Consequent-pole Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor', *Energy Reports*. Elsevier, 6, pp. 914-920.
- Xu, Y. dkk. (2020) 'Reduction method of high-frequency audible PWM noise for three-phase permanent magnet synchronous motors', *Energy Reports*. Elsevier, 6, pp. 1123-1129.
- Yan, X. dkk. (2020) 'Virtual synchronous motor based-control of Vienna rectifier', *Energy Reports*. Elsevier, 6, pp. 953-963.
- Yang, Y. dkk. (2020) 'Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles', *Energy*. Elsevier, 213, p. 118859.
- Zhang, S. dkk. (2020) 'Bursting oscillations and bifurcation mechanism in a permanent magnet synchronous motor system with external load perturbation', *Chaos, Solitons & Fractals*. Elsevier, 141, p. 110355.