

Efek Sudut Kemiringan Alur Rotor Motor Arus Searah terhadap Torsi dan Daya Luaran

Herlina^{1,*}, Sri Agustina¹, Sariman¹, Diaz Dwi R¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya
Inderalaya, Indonesia

corresponding author: herlinawahab@unsri.ac.id

Abstrak— Penggunaan motor listrik yang semakin luas di berbagai bidang mengakibatkan tuntutan terhadap karakteristik motor listrik yang semakin baik dan efisien. Pada penelitian ini motor yang digunakan sebagai objek adalah motor arus searah (MAS), jenis ini diketahui lebih banyak memiliki keunggulan dibandingkan jenis lainnya. Efisiensi MAS ini diharapkan sebesar mungkin dengan indikatornya besaran daya, torsi, arus yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efek dari perubahan atau penambahan kemiringan alur rotor terhadap nilai torsi dan daya yang dihasilkan. Metode yang digunakan adalah restrukturisasi model MAS dengan penambahan kemiringan alur rotor kearah kanan sejauh 25 derajat dan 45 derajat dari model referensi yang tegak lurus 90 derajat. Pengukuran dilakukan pada tegangan 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 Volt. Selain itu penelitian ini juga menambahkan PWM pada rangkaian pengukuran dan pengujiannya. Hasil yang didapatkan pengukuran kecepatan motor (RPM), semakin tinggi tegangan motor akan mengakibatkan RPM yang makin besar pula. Semakin besar sudut kemiringan alur rotor, maka kenaikan RPM juga makin besar. RPM terbesar didapatkan pada pengukuran tegangan 12 V sudut kemiringan 45 derajat dengan kecepatan motor sebesar 2925 RPM, begitu juga dengan nilai torsinya sebesar 0,019 Nm. Secara prinsip nilai torsi akan berbanding terbalik dengan kecepatan putar. Namun, dalam penelitian ini, ini terjadi sebaliknya. Ini disebabkan oleh penggunaan PWM yang berfungsi sebagai pengubah lebar pulsa tanpa mengurangi nilai torsi. Hal inilah yang menghasilkan peningkatan torsi seiring dengan kecepatan putar MAS.

Keywords—*Kemiringan, alur, Rotor, Motor Arus Searah, Torsi, Daya*

Abstract— The widespread use of electric motors in a variety of disciplines necessitates improved and more efficient motor characteristics. The object of this research is a direct current motor (DCM), which is known to have more advantages than other motor types. On the basis of the indicators of generated power, torque, and current, the DCM efficiency is anticipated to be as high as feasible. This research aims to determine the effect of altering or adding the slope of the rotor groove on the torque and power values produced. The method employed is the restructuring of the DCM model with the addition of a rotor groove sloping to the right of 25 and 45 degrees from the reference model, which is perpendicular to 90 degrees. Voltages of 2, 4, 6, 8, 10, and 12 Volts were used for measurements. In addition, PWM is added to the series of measurements and investigated in this study. According to the motor speed measurement results, the higher the motor voltage, the higher the motor speed (RPM). The greater the rotor groove's angle of inclination, the greater the increase in RPM. With a motor speed of 2925 RPM and a torque value of 0.019 Nm, the highest RPM was obtained from a 12 V voltage measurement at a 45-degree tilt angle and a motor speed of 2925 RPM. In theory, torque is inversely proportional to rotational speed. However, the opposite was true in this research. This is due to the use of pulse-width modulation, which functions as a pulse-width converter without diminishing torque. This is what causes an increase in torque along with the DCM's rotational speed.

Keywords—*Inclination, Groove, Rotor, Direct Current Motor, Torque, Power*

I. PENDAHULUAN

Saat ini daya listrik menjadi kebutuhan mendasar di berbagai bidang terutama di bidang industri. Laporan Kementerian ESDM menunjukkan bahwa konsumsi listrik per kapita Indonesia pada tahun 2022 mencapai 1.173 kilowatt-jam per kapita, naik sekitar 4% dibandingkan tahun 2021 (tahun ke tahun/tahun). Angka ini merupakan rekor tertinggi dalam lima puluh tahun terakhir [1, 2]. Akibatnya, ketersediaan listrik yang disediakan oleh perusahaan pengelola daya (PLN) ini harus stabil, murah, dan aman bagi pengguna. Hal ini akan menguntungkan industri dalam negeri untuk menyediakan barang-barang berkualitas tinggi dengan harga yang kompetitif. Sumber daya listrik sangat memengaruhi keberhasilan *Making Indonesia 4.0*, yang menggabungkan strategi pembangunan industri nasional dengan penerapan industri 4.02 .

Motor arus searah digunakan dalam berbagai bidang kehidupan. Ini adalah jenis motor listrik yang mengubah energi arus searah menjadi energi mekanik. Berdasarkan interaksi antara dua fluks magnetik, motor arus searah digunakan untuk menggerakkan berbagai peralatan dan alat transportasi yang membutuhkan berbagai kecepatan dan beban kerja. Misalnya, motor starter mobil, *tape recorder*, mainan anak-anak, lokomotif

atau kereta, mesin bubut, pompa air, mesin jahit, kulkas, freezer, dan lain-lain. Metode konvensional atau rangkaian elektronik dapat digunakan untuk mengontrol kecepatan putar motor arus searah.

Pulse width modulation (PWM) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengontrol kecepatan putar motor. Di tahun 2010, Hamdani telah mendahului meneliti penggunaan PWM untuk mengontrol kecepatan putar motor DC terhadap fluktuasi temperatur. Prototipe yang dihasilkan memungkinkan untuk mengontrol kecepatan Motor DC dengan PWM. Pengendalian dilakukan dengan pengaturan durasi waktu tunda dari pulsa yang diumpangkan kepada rangkaian pengendali (driver) motor DC 12 Volt yang juga berfungsi sebagai penguat sinyal PWM [3]. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Silalahi di tahun 2021 yang membandingkan penggunaan inverter PWM dan sinusoidal PWM untuk mengontrol kecepatan motor induksi 3 fasa. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa dengan menggunakan inverter PWM menghasilkan kinerja yang lebih baik yaitu sebesar 84 persen dibandingkan dengan sinusoidal PWM [4]. Selain itu para peneliti dunia juga telah melakukan penelitian sejenis seperti yang dilakukan oleh Heng Shi di tahun 2021 yang mengontrol pelacakan arus eksitasi mesin sinkron berbasis PWM untuk pesawat dengan hasil simulasi menunjukkan peningkatan kinerja yang cukup besar untuk kinerja dinamis sistem pembangkit penyearah PWM jika dibandingkan dengan sistem penyearah dioda tradisional, termasuk waktu penyesuaian dinamis yang lebih baik, kemampuan anti-gangguan yang lebih baik, tegangan transien yang lebih rendah, dan THD arus fasa yang lebih rendah [5].

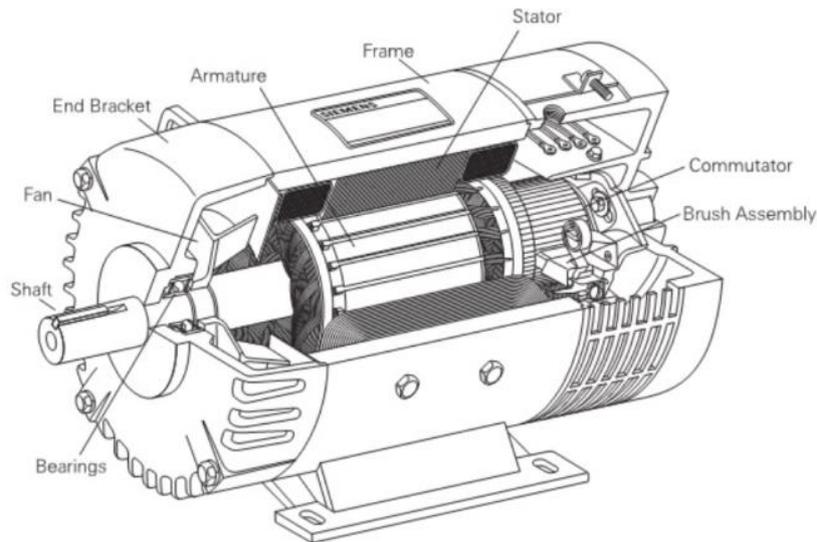
Thanh di tahun 2021 melakukan penelitian dengan mengoptimalkan sudut kemiringan batang rotor motor induksi menggunakan pemodelan analitis dengan tujuan melihat perubahan daya dan efektifitas dari motor [6]. Mengatur kemiringan alur rotor pernah dilakukan oleh Yuski di tahun 2017 dengan mengubah kemiringan alur rotor menjadi 30 derajat ke kanan dan 30 derajat ke kiri dari posisi awal. Hasil yang dicapai adalah terjadi peningkatan daya yang dihasilkan ketika alur rotor dimiringkan baik ke kiri maupun ke kanan [7]. Berdasarkan latar belakang di atas, pada penelitian ini penulis bertujuan untuk menganalisis perubahan RPM dan torsi yang terjadi jika terjadi perubahan sudut kemiringan alur rotor sebesar 25 dan 45 derajat. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi ilmu pengetahuan khususnya untuk MAS yang sekarang ini makin banyak digunakan untuk berbagai bidang kehidupan. Selain itu, hasil yang didapatkan dapat dijadikan acuan untuk penelitian lanjutan dengan perkembangan disain dan hasil yang lebih baik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Motor Arus Searah (MAS)

Di bidang industri, penggunaan listrik paling banyak adalah untuk mesin-mesin listrik dan penerangan. Mesin listrik adalah mesin yang mengkonversi energi menggunakan medan elektromagnetik untuk perubahan energi listrik sebagai masukan menjadi energi mekanis sebagai keluarannya. Klasifikasi mesin listrik berdasarkan arah transformasi energi dibedakan menjadi generator dan motor listrik. Sedangkan klasifikasi berdasarkan jenis besaran listrik yang dihasilkan menjadi transformator, mesin arus searah, dan mesin arus bolak-balik. Prinsip dasar mesin listrik adalah penggunaan medan elektromagnetik sebagai pengkonversi energi terhadap energi listrik dan energi mekanis. Definisi motor listrik adalah mesin yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gerak) untuk melakukan suatu tugas. Sedangkan generator adalah kebalikannya. Baik motor listrik mau pun generator diklasifikasikan berdasarkan arusnya searah (*Direct Current*) atau bolak-balik (*Alternating Current*). Untuk pembagiannya adalah motor DC, motor AC, generator AC dan generator DC [8].

Motor arus searah (MAS) atau Direct Current (DC) merupakan bagian dari mesin listrik dengan fungsinya sebagai pengubah arus listrik sebagai masukan menjadi energi mekanik atau gerak. MAS ini dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu MAS tipe shunt, tipe seri, dan tipe campuran (*Compound*). Perbedaan untuk jenis shunt, kumparan medannya dihubungkan seri dengan kumparan armature, sedangkan untuk jenis seri kedua kumparan dihubungkan seri. MAS Jenis compound memiliki kumparan medan yang dihubungkan secara parallel, kemudian dihubungkan seri dengan kumparan armaturnya. Pada MAS seri penambahan beban akan mengurangi kecepatan motornya. Konstruksi umum MAS sama seperti konstruksi mesin listrik lainnya, yaitu terdiri dari stator dan rotor. Bagian stator terbagi lagi menjadi bagian badan atau frame, magnet, sikat dan komutator. Bagian rotor terbagi menjadi rotor jangkar beserta lilitannya, poros jangkar, kumparan jangkar dan inti jangkar itu sendiri. Untuk lebih jelas, konstruksi MAS dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Konstruksi MAS [9]

MAS bekerja dengan prinsip konversi energi listrik arus searah menjadi energi mekanis. Jenis mesin ini memiliki 2 kumparan yang menghasilkan fluks magnetik yang berinteraksi, kumparan tersebut adalah kumparan medan dan jangkar. Fluks magnetik yang mengalir dari kutub utara ke selatan dihasilkan oleh kumparan medan, sedangkan fluks magnetik yang arahnya melingkar dihasilkan oleh kumparan jangkar. MAS beroperasi ketika arus searah mengalir melalui penghantar listrik yang diletakkan pada medan magnet. Penghantar listrik mengalami gaya gerak listrik (GGL) yang menghasilkan torsi berupa rotasi mekanik. GGL induksi ini dihasilkan oleh penghantar listrik saat berputar di dalam medan magnet. Untuk menyearahkan arus listrik, merupakan fungsi dari cincin belah atau komutator yang dipasang pada rotor.

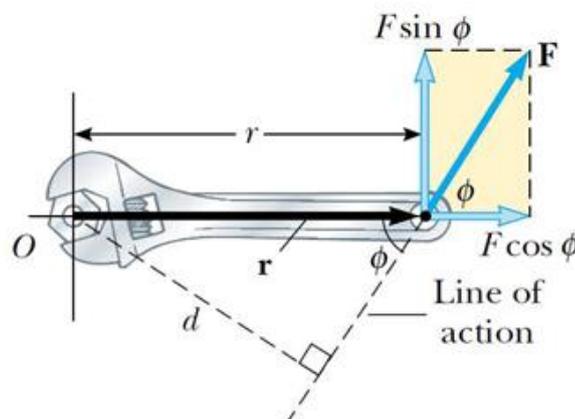
Untuk menghitung besaran gaya pada MAS berdasarkan kaidah tangan kiri (percobaan Lorents) menggunakan persamaan berikut ini [8]:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \theta \tag{1}$$

F merupakan gaya pada penghantar dengan satuan Newton, B mewakili rapat garis gaya pada magnet dengan satuan Weber/m², I merupakan kuat arus dalam satuan Amper dan θ merupakan sudut diantara garis gaya magnet dan kawat penghantar.

B. Torsi, Kecepatan dan Daya MAS

Definisi torsi adalah tenaga gerak yang dihasilkan oleh motor listrik arus searah yang diukur dalam satuan Newton meter (Nm). Jumlah putaran per menit (*rotation per minute/RPM*) yang dihasilkan oleh motor listrik arus searah disebut sebagai kecepatan. Perhitungan torsi didapatkan dari gambar 2 berikut ini:



Gambar 2. Pola Torsi MAS [7]

Dari gambar di atas dapat diturunkan menjadi persamaan berikut ini [8]:

$$\tau = r \cdot F \cdot \sin \theta \quad (2)$$

dimana T merupakan torsi motor dengan satuan Newton meter (Nm), r mewakili jarak dalam satuan meter, θ merupakan sudut yang berada diantara ujung benda dan gaya diukur dalam derajat, dan F merupakan gaya dengan satuannya Newton. Daya didefinisikan sebagai jumlah energi listrik yang digunakan oleh motor listrik arus searah. Ini biasanya diukur dalam satuan Watt (W) atau *Horsepower* (HP). Pada motor listrik arus searah, hubungan antara torsi dan daya adalah berbanding lurus dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = w \cdot t \quad (3)$$

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

di sini, w adalah kecepatan sudut dalam radian per detik dan t adalah torsi dalam Newton meter (Nm), V adalah tegangan dalam satuan Volt (V) dan I merupakan arus dalam satuan ampere (A). Hubungan antara kecepatan dan torsi motor listrik arus searah adalah berbanding terbalik. Kecepatan putar motor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [8]:

$$N = \frac{5252 \times P}{T} \quad (5)$$

$$n = \frac{P \times 60}{\tau \times 2\pi} \quad (6)$$

dimana P adalah daya HP dan N adalah kecepatan RPM. Torsi yang dihasilkan oleh motor meningkat seiring dengan kecepatan motor.

C. Modulasi Lebar Pulsa

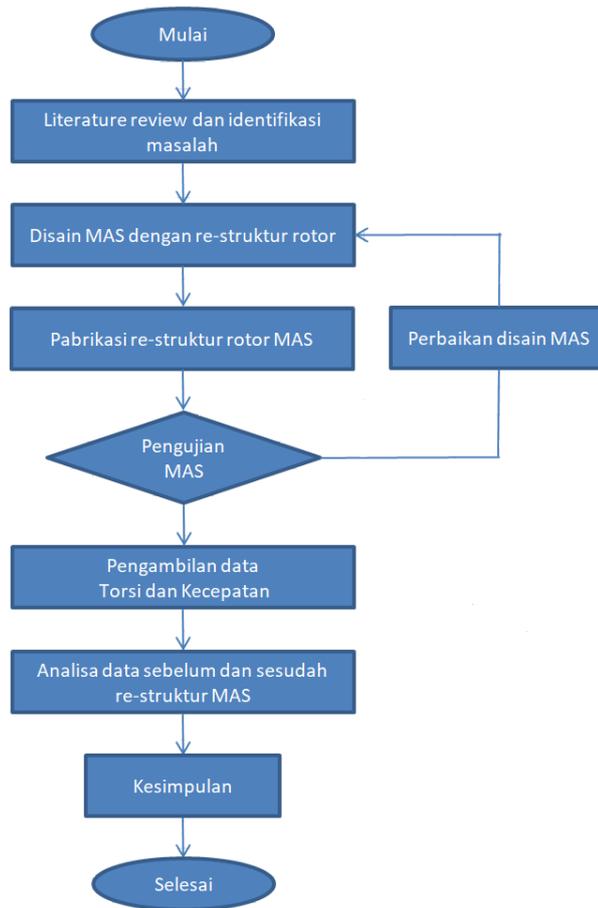
Modulasi lebar pulsa (Pulse Width Modulation/PWM) merupakan perangkat tambahan yang penggunaannya memiliki fungsi sebagai modulasi lebar pulsa untuk pengaturan kecepatan putar motor. Pengaturan modulasi ini dengan tidak mengubah besar amplitudo maupun frekuensi. Gambar PWM dapat dilihat pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. PWM pengontrol kecepatan

III. METODOLOGI PENELITIAN

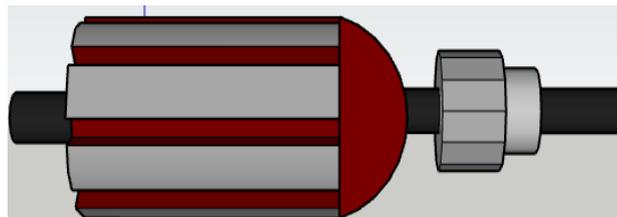
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin-Mesin Listrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya Inderalaya, selama kurun waktu September-November 2022. Alur Penelitian mengikuti alur yang dibuat pada diagram berikut 4 ini:



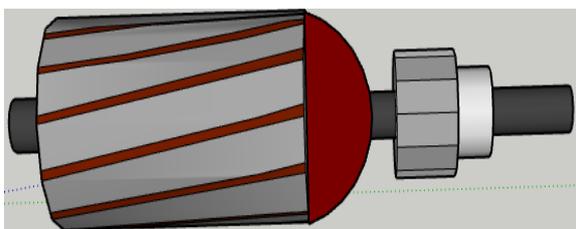
Gambar 4. Diagram alir penelitian

Penelitian ini melalui beberapa tahapan pengerjaan, yaitu tahap disain, pabrikasi dan pengujian.

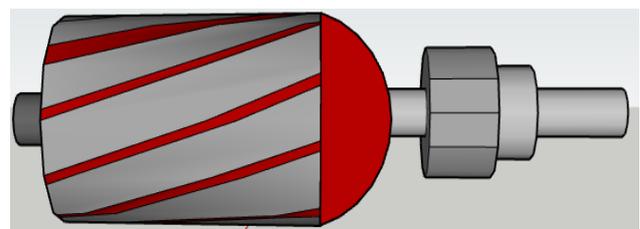
- Pada tahap disain ditetapkan spesifikasi Motor Arus Searah (MAS) yang dijadikan sebagai referensi dan dua disain restruktur rotor dengan masing-masing kemiringan alur sebesar 25 derajat dan 45 derajat. Adapun pemilihan sudut kemiringan alur ini dengan melihat penelitian sebelumnya yang telah dilaksanakan dengan sudut kemiringan alur sebesar 30 derajat. Ketiga disain MAS tersebut dapat dilihat pada gambar 5 berikut ini:



(a). Disain MAS Referensi



(b). Disain MAS Restruktur rotor alur 25°



(c). Disain MAS Restruktur rotor alur 45°

Gambar 5. Disain MAS Referensi dan Restruktur

- Setelah melalui tahapan disain, kedua disain resktruktur diaplikasikan pada MAS referensi. Tahap pabrikasi ini membutuhkan ketelitian tinggi untuk mendapatkan hasil seperti yang telah di set pada disain awal.
- Tahapan selanjutnya adalah melakukan pengujian dan pengukuran parameter-parameter. Kecepatan putar MAS dengan satuan rotasi per menit (RPM) untuk kedua disain restruktur diukur pada tegangan 2-12 Volt dengan rentang kenaikan tiap 2 Volt, begitu juga dengan pengukuran torsi dan arus MAS.
- Tahap akhir adalah tahapan pengolahan data. Pada tahapan ini dilakukan perhitungan untuk torsi dan daya pada ketiga disain MAS, serta analisa hasil perhitungan dan pengukuran.

Sebagai referensi MAS yang digunakan adalah motor tipe NC5475 dengan spesifikasi khusus sebagai berikut:

- Model : NC5475F
- Tegangan : 24 Volt
- Efisiensi kondisi maksimum
 - Torsi : 54.93
 - Kecepatan : 1694 rpm
 - Arus : 0.599 Amper
 - Daya luaran : 0.75 Watt
 - Efisiensi : 67.8%
- Daya luaran pada kondisi operasi kontinu : 14.7 Watt
- Kondisi tanpa beban
 - Kecepatan : 1993 Rpm
 - Arus : 0.106 Amper
- Kondisi Awal
 - Torsi : 366.30
 - Arus : 3394 Amper
- Berat : 700 gram

Gambar 6 berikut ini merupakan gambar MAS NC5475 yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 6. MAS Referensi

Setelah penentuan model referensi dan restrukturisasi rotor, semua model di manufaktur dan dilakukan pengujian untuk mengetahui torsi, kecepatan dan daya yang dihasilkan pada masing-masing model.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Manufaktur MAS

Data spesifikasi MAS referensi telah dinyatakan di atas. Untuk spesifikasi disain restruktur rotor MAS adalah sebagai berikut:

- Jumlah alur rotor : 7 alur
- Panjang : 3,2 cm
- Diameter : 1,6 cm
- Jumlah lilitan : 46 lilitan
- Diameter kawat : 0,35 mm

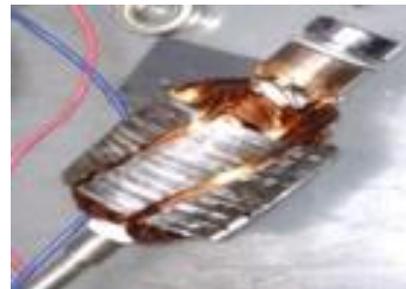
Dari spesifikasi disain di atas kemudian diimplementasikan menjadi 3 bentuk MAS masing-masing adalah MAS referensi tanpa kemiringan alur rotor, kemiringan 25° dan 45°. Untuk melihat perbedaan yang jelas antara ketiganya, dapat dilihat pada gambar berikut 7 ini.



(a). MAS Referensi



(b) MAS Restruktur alur rotor 25°



(c) MAS Restruktur alur rotor 45°

Gambar 7. Manufaktur MAS Referensi dan restruktur

B. Pengukuran Putaran Rotor dan Arus MAS

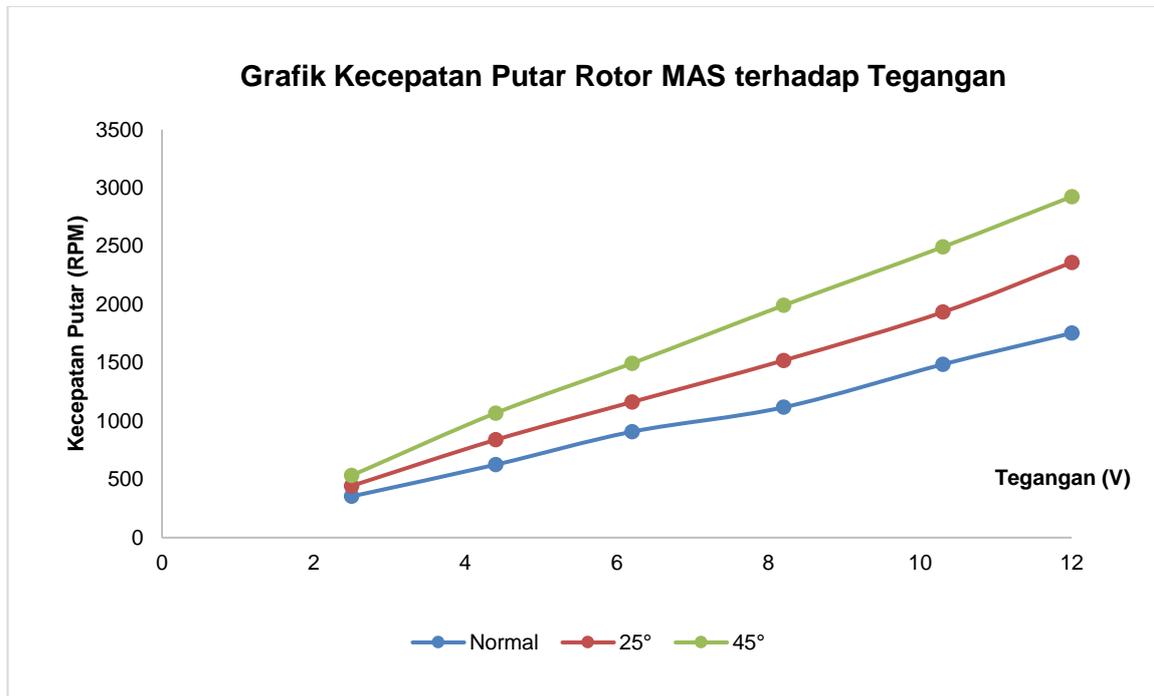
Restruktur MAS dilakukan dengan membuat kemiringan alur rotor sebesar 25 dan 45 derajat. Setelah proses manufaktur disain, tahapan penelitian selanjutnya adalah pengukuran variabel putaran rotor, dan arus pada ketiga MAS. Pengukuran didisain pada tegangan 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 Volt. Namun karena pengukuran menggunakan tachometer digital mengakibatkan tidak sama persis dengan yang telah ditentukan. Data hasil pengukuran RPM dan arus MAS dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini:

TABEL 1. DATA PENGUKURAN PUTARAN DAN ARUS MAS

Putaran Rotor MAS (RPM)	Tegangan (volt)					
	2,5	4,4	6,2	8,2	10,3	12
Referensi						
RPM	353,3	625,5	908,4	1118	1486	1754
Arus (A)	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15
Alur rotor Miring 25°						
RPM	443,5	838,7	1163	1520	1934	2360
Arus (A)	0,11	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30
Alur rotor Miring 45°						
RPM	532,5	1068	1495	1992	2493	2925
Arus (A)	0,18	0,26	0,33	0,42	0,46	0,49

Dari tabel 1 diatas dapat dilihat bahwa pada tegangan yang sama, dengan merestrukturisasi kemiringan alur rotor terjadi kenaikan kecepatan motor yang signifikan. Pada pengukuran tegangan terkecil 2,5 V didapat kecepatan motor berturut-turut pada model referensi, alur 25 derajat dan 45 derajat adalah 353,3; 443,5 kenaikan sebesar 25 persen dan 532,5 atau mengalami kenaikan sebesar 50 persen. Untuk pengukuran dengan tegangan tertinggi 12 Volt, didapatkan kecepatan motor berturut-turut pada model referensi, alur 25 derajat dan 45 derajat adalah 1754, 2360 (kenaikan sebesar 34 persen) dan 2925 (kenaikan sebesar 67 persen). Pada

tegangan 2,5 Volt, arus hasil pengukuran secara berturutan pada model referensi, alur 25 derajat dan alur 45 derajat adalah sebesar 0,09 A, 0,11 A dan 0,18 A. tren yang terjadi pada pengukuran tegangan berikutnya juga mengalami kenaikan arus lebih dari 20 persen. Jika digambar dalam bentuk grafik, dapat dilihat secara lengkap pada grafik 8 berikut ini.



Gambar 8. Hasil Pengukuran Kecepatan Putar Rotor MAS terhadap Tegangan

Seperti yang ditunjukkan oleh hasil pengukuran pada gambar 8 di atas, kita dapat melihat dan menganalisis perbedaan RPM dari ketiga motor arus searah yang digunakan. Pada grafik ditunjukkan bahwa MAS dengan kemiringan alur sebesar 45° menghasilkan kecepatan motor RPM tertinggi dengan tegangan yang sama dibandingkan dengan model referensi dan kemiringan alur 25 derajat. MAS referensi menghasilkan RPM terkecil. Dapat disimpulkan bahwa makin besar sudut kemiringan alur rotor akan menghasilkan kecepatan rotor yang makin besar.

C. Perhitungan Torsi dan Daya MAS

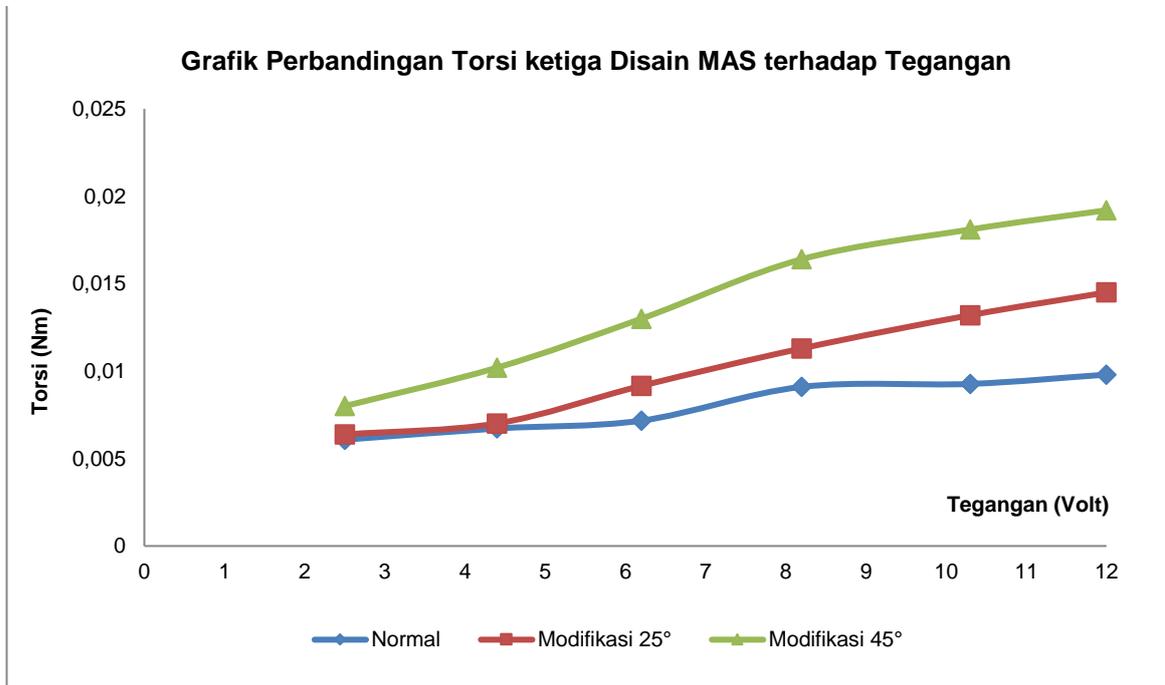
Pada penelitian selain pengukuran, dilakukan juga perhitungan daya dan torsi yang dihasilkan oleh ketiga jenis MAS yang digunakan. Untuk perhitungan daya digunakan persamaan (4) dan perhitungan torsi menggunakan persamaan (6). Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini.

TABEL 2. HASIL PERHITUNGAN TORSI DAN NILAI DAYA MAS

Putaran Rotor MAS (RPM)	Tegangan (volt)					
	2,5	4,4	6,2	8,2	10,3	12
Referensi						
Daya (Watt)	0,26	0,44	0,68	1,066	1,442	1,80
Arus (Amper)	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15
Torsi (Nm)	0,0061	0,0067	0,0072	0,0091	0,0093	0,0098
Alur rotor Miring 25°						
Daya (Watt)	0,25	0,62	1,12	1,80	2,68	3,6
Arus (Amper)	0,11	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30
Torsi (Nm)	0,0064	0,0070	0,0092	0,0113	0,0132	0,0145
Alur rotor Miring 45°						
Daya (Watt)	0,45	1,14	2,046	3,44	4,738	5,88
Arus (Amper)	0,18	0,26	0,33	0,42	0,46	0,49
Torsi (Nm)	0,008	0,010	0,013	0,016	0,018	0,019

Hasil perhitungan pada tabel 2 di atas memiliki kecenderungan kenaikan ada setiap penambahan kemiringan alur rotor. Untuk perhitungan pada nilai tegangan terkecil besaran daya mengalami fluktuatif secara berturutan pada model referensi, kemiringan alur 25 dan 45 adalah sebagai berikut : 0,26 watt, 0,25 watt dan 0,45 watt. Sedangkan pada perhitungan tegangan tertinggi 12 V terjadi kenaikan daya yang sangat signifikan dibandingkan dengan model referensi. Secara berturutan model referensi, alur 25 dan 45 adalah sebagai berikut: 1,80 watt, 3,6 watt (kenaikan 100 persen) dan 5,88 watt (kenaikan 227 persen). Hal serupa juga terjadi

pada perhitungan torsi motor. Untuk perhitungan torsi di tegangan 2,5 Volt, nilai torsi secara berturutan dimulai dari model referensi, kemiringan alur 25 dan 45 derajat adalah sebagai berikut : 0,0061 Nm, 0,0064 Nm dan 0,008 Nm. Untuk perhitungan torsi di kecepatan motor 12 Volt didapatkan hasil secara berturutan adalah sebagai berikut : 0,0098 Nm, 0,0145 Nm (kenaikan 48 persen), dan 0,019 Nm (kenaikan 94 persen). Kemiringan alur yang makin besar mengakibatkan torsi dan daya yang dihasilkan juga semakin besar. Dalam bentuk grafik, hasil perhitungan torsi terhadap tegangan dapat dilihat pada gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Perbandingan Hasil Perhitungan Torsi MAS terhadap Tegangan

Pada gambar 9 dapat dilihat tren kenaikan torsi berbanding lurus dengan kenaikan tegangan. Dari hasil penelitian di atas dapat dilihat pengaruh kemiringan alur rotor MAS ini. Dengan perhitungan dapat dihubungkan dengan persamaan (2)

$$\tau = r \cdot F \cdot \sin \theta$$

Dengan merestrukturisasi kemiringan alur menjadi 25 dan 45 derajat, di saat kemiringan alur 45 derajat maka nilai sinus makin besar mengakibatkan torsi yang dihasilkan pun semakin besar. Sedangkan kecepatan motor jika dilihat dari persamaan (6), yaitu:

$$n = \frac{P \times 60}{\tau \times 2\pi}$$

Jika berdasarkan persamaan di atas, nilai torsi akan berbanding terbalik dengan kecepatan putar. Namun pada penelitian ini kondisi yang terjadi adalah sebaliknya. Hal ini disebabkan karena ketika pengukuran ditambahkan PWM sebagai mana diketahui fungsi PWM adalah untuk memanipulasi lebar pulsa tanpa menurunkan nilai torsi. Hal inilah yang mengakibatkan torsi yang dihasilkan pun semakin meningkat seiring dengan pertambahan kecepatan putar MAS.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan dengan mendisain dan manufaktur MAS menjadi tiga bentuk alur rotor yaitu, lurus (tanpa kemiringan), sudut kemiringan 25 derajat dan 45 derajat. Pengukuran torsi dilakukan dengan menggunakan bantuan *Pulse Width Modulation* (PWM) yang menghasilkan torsi dan kecepatan yang makin besar jika alur kemiringan diperbesar. Pengukuran di setting dengan memberikan tegangan tiap kenaikan 2 Volt, yaitu mulai dari 2 V sampai dengan 12 Volt. Dari hasil pengukuran dan perhitungan terlihat perbedaan signifikan ketika sudut kemiringan alur rotor diperbesar dan besar tegangan juga mempengaruhi putaran rotor makin tinggi. Hal ini bisa dilihat pada tabel 2 di atas. Untuk penelitian yang akan datang perlu untuk dilakukan modifikasi kemiringan alur rotor dengan kemiringan yang lebih variatif dengan penggunaan PWM maupun tanpa PWM.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] EBTKE, "Dirjen EBTKE Paparkan Pemenuhan Kebutuhan Listrik Indonesia Melalui Pemanfaatan EBT," available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/01/20/3405/dirjen.ebtke.paparkan.pemenuhan.kebutuhan.listrik.indonesia.melalui.pemanfaatan.ebt>, akses 6 Maret 2023.
- [2] A. Ahdiat, "Konsumsi Listrik Penduduk Indonesia Naik pada 2022, Capai Rekor Baru," available: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/02/23/konsumsi-listrik-penduduk-indonesia-naik-pada-2022-capai-rekor-baru>, akses 6 Maret 2023.
- [3] M. Hamdani, "Pengendalian kecepatan putaran motor DC terhadap perubahan temperature dengan system modulasi lebar pulsa," Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 2010.
- [4] A. S. Silalahi, "Perbandingan pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan inverter pulse width modulation (PWM) dan sinusoidal pulse width modulation (SPWM)," Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Sumatera Utara, 2021.
- [5] H. Shi, Z. Zhang, Y. Li, J. Li, J. Han, and X. Liu, "Excitation current tracking control wound rotor synchronous machine based on PWM rectifier for more electric aircraft," in 24th International conference on electrical and systems (ICEMS), , Gyeongju, Korea, Republic of, November 2021, pp. 873-87,.
- [6] T. T. To, E. Roshandel, A. Mahmoudi, Z. Cao, and S. Kahourzade, "Optimization of IM rotor bars inclination angle using analytical model in free FEA software," in 2021 IEEE Energy conversion congress and exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, November 2021, pp. 4119-4126.
- [7] M. Nur Yuski, W. Hadi, dan A. Saleh, "Rancang bangun jangkar motor DC," Berkala sainstek, vol.2 2017, pp. 98-103.
- [8] S. A. Nasar, Handbook of electric machines; Mc. Graw-Hill, University of Michigan, 1987.
- [9] Ciwa, VSD Basic 4 – Motor DC, available: <https://automation.or.id/2020/01/13/vsd-basic-4-motor-dc/> , akses 7 Maret 2023.