

Analisa Motor Bertenaga Magnet Permanen

Senanjung Prayoga¹, Gunawan Nugroho²

Jurusan Magister Teknik Fisika, Fakultas Teknik Industri, Institut Sepuluh Nopember Surabaya

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

email: senanjung_prayoga@yahoo.co.id¹, gunawanf31@gmail.com²

Abstract—The development of the motor at this time is very rapidly, and has been used in almost all areas namely industry, transport, agriculture, commercial and even households. The use of an electric motor, this spent electrical energy nearly doubled from lighting, which reached 46% of global electricity consumption. Even in the field of industry, the use of electric motors are reach to 70% of total electricity consumption. The use of large electric motors that, drive many researchers to create more energy-efficient of electric motors, even now there are patent motor states that the motor does not use electricity to make it spin, but using only the repulsive force between the magnets mounted on the stator and rotor. This technology is very important to be developed, given the need for electrical energy continues to increase, while the non-renewable energy sources are getting depleted. Therefore, the research will be conducted aimed at getting the design that can produce maximum torque. This study has been carried out a simulation of permanent magnet motor design with a range of parameter variations. Based on these simulations, it was found that the design can produce a torque of 1,33 N*m, which use permanent magnet material NdFeB 52 MGOe, with values of parameters: inclination angle (α) 42°; number of stator 30 pieces; number of rotor 6 pieces, distance of air gap 1 mm and direction of the magnetic is unidirectional.

Keyword: Motor, Permanent Magnet, Design.

Abstrak—Perkembangan motor saat ini sangat pesat, dan sudah masuk ke hampir semua bidang, yaitu industri, transportasi, pertanian, komersial dan bahkan rumah tangga. Penggunaan motor listrik menghabiskan energi listrik mencapai dua kali lipat dari pencahayaan, yaitu mencapai 46% dari konsumsi listrik global. Bahkan pada bidang industri, penggunaan motor listrik mencapai 70% dari total konsumsi listrik. Penggunaan motor listrik yang besar tersebut mendorong banyak peneliti untuk menciptakan motor yang lebih hemat energi listrik, bahkan saat ini sudah ada patent motor yang menyatakan bahwa motor tersebut tidak menggunakan tenaga listrik untuk membuatnya bisa berputar, melainkan hanya menggunakan gaya tolak antar magnet yang terpasang pada stator dan rotornya. Teknologi tersebut sangat penting untuk dikembangkan, mengingat kebutuhan energi listrik terus meningkat, sedangkan sumber energi tak terbarukan semakin hari semakin menipis. Oleh karena itu akan dilakukan penelitian yang ditujukan untuk mendapatkan desain yang bisa menghasilkan torsi maksimal. Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi terhadap desain motor bertenaga magnet permanen dengan berbagai variasi parameter. Berdasarkan simulasi tersebut, didapatkan desain yang bisa menghasilkan torsi sebesar 1,33 N*m, dengan menggunakan magnet permanen NdFeB 52 MGOe dengan nilai parameter: sudut kemiringan (α) rotor dan stator 42°; jumlah stator 30 buah; jumlah rotor 6 buah, jarak airgap 1 mm dan arah magnetnya adalah searah.

Kata kunci: Motor, Magnet Permanen, Desain

I. PENDAHULUAN

Perkembangan motor saat ini sangat pesat, dan penggunaan motor masuk ke hampir semua bidang, yaitu industri, transportasi, pertanian, komersial dan bahkan rumah tangga. Penggunaan motor listrik menghabiskan energi listrik mencapai dua kali lipat dari pencahayaan, yaitu mencapai 46% dari konsumsi listrik global. Bahkan pada bidang industri, penggunaan motor listrik mendominasi konsumsi energi listrik. Dalam aplikasi industri, motor listrik yang digunakan untuk menghidupkan pompa, kipas, kompresor, konveyor, dan penggerak mesin lainnya. Motor listrik dalam bidang industri menghabiskan energi listrik rata-rata mencapai 64% dari total konsumsi listrik [1].

Penggunaan motor listrik yang besar tersebut mendorong banyak peneliti untuk menciptakan motor yang lebih hemat energi listrik. Saat ini telah dilakukan penelitian untuk mengetahui motor mana yang lebih efisien untuk digunakan pada bidang industri. Motor magnet permanen ternyata memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi. Efisiensi motor induksi pada saat beban penuh mencapai 93,6%, sedangkan motor magnet permanen dapat mencapai 96,2% [2].

Perkembangan motor listrik yang menggunakan magnet permanen mengalami kemajuan yang signifikan. Dahulu,

material permanen magnet yang digunakan adalah magnet alnico atau keramik. Keduanya memiliki beberapa kelemahan, sehingga saat ini material magnet yang bagus untuk digunakan adalah magnet neodmium. Magnet neodmium merupakan magnet permanen yang memiliki daya magnet paling besar dibandingkan dengan yang lain, sehingga motor yang dihasilkan pun juga bisa memiliki efisiensi yang tinggi [2]

Pengembangan motor magnet permanen tidak hanya sebatas pada materialnya saja, namun pada model/ jenisnya juga. Saat ini sudah banyak model motor magnet permanen yang telah dikembangkan, baik yang sudah dikomersialkan maupun masih dalam tahap penelitian.

Pengembangan lain dari motor magnet permanen adalah perendev motor yang dikembangkan oleh Mike Brady. Mike Brady telah mematenkan penemuannya ini dengan nomer paten WO 2006/045333 AI [3]. Namun, motor perendev ini berbeda dengan motor magnet permanen yang lainnya, yaitu motor ini tidak menggunakan tenaga listrik untuk membuatnya bisa berputar. Motor perendev ini menggunakan magnet permanen pada stator dan rotornya. Prinsip kerja motor magnet permanen ini adalah memanfaatkan sifat magnet yang akan saling tolak menolak apabila didekatkan dengan kutub yang sejenis. Berdasarkan prinsip tersebut, magnet disusun sedemikian rupa sehingga membentuk rotor dan stator pada

motor, dan pada akhirnya motor magnet permanen dapat berputar tanpa menggunakan bahan bakar ataupun energi lainnya, cukup dengan mengandalkan kekuatan magnet.

Teknologi tersebut sangat penting untuk dikembangkan, mengingat kebutuhan energi listrik terus meningkat, sedangkan sumber energi tak terbarukan semakin hari semakin menipis. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai teknologi tersebut. Penelitian yang akan dilakukan ini ditujukan untuk mendapatkan desain yang bisa menghasilkan torsi yang maksimal dari alat tersebut berdasarkan patent yang sudah ada sebelumnya.

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan menganalisa sebaran fluks magnetik yang bekerja pada motor magnet tersebut secara komputasi dengan menggunakan metode finite element. Metode ini dipilih karena merupakan metode numerik yang terbukti efisien dalam menyelesaikan permasalahan medan magnetik [4].

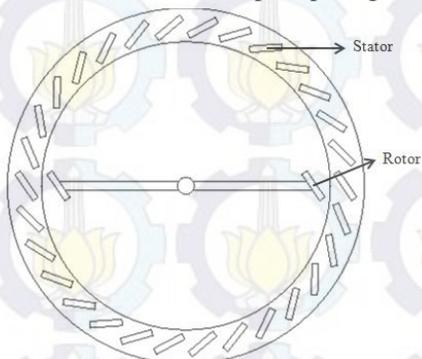
II. METODE

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan desain motor bertenaga magnet permanen yang menghasilkan torsi maksimal. Untuk mendapatkan desain tersebut, dilakukan variasi pada parameter-parameter yang ada pada desain motor. Variasi tersebut diperlukan untuk mencari nilai yang paling optimal sehingga bisa menghasilkan torsi yang tinggi. Variasi tersebut kemudian dianalisa dengan menggunakan metode perhitungan numerik finite element.

A. Tahapan Analisa Komputasi dengan Metode Finite Element

1. Pendesainan Dimensi Motor Magnet Permanen

Desain motor ini meliputi rotor dan stator. Untuk tahap awal, diberikan desain sementara seperti pada gambar 1.

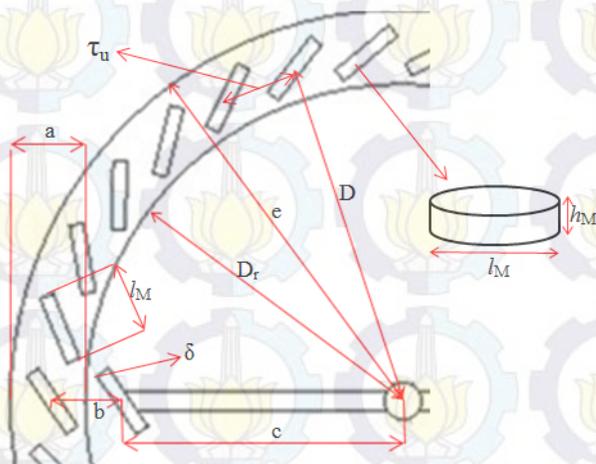


Gambar 1. Desain 2D Motor Magnet Permanen Yang Akan Dianalisa

Ukuran dari dimensi parameter dari motor magnet permanen ini bisa dilihat pada gambar 2 dan nilainya tertera pada tabel 1.

Ada dua struktur rotor yang umum dari motor magnet permanen yaitu *surface permanent magnet rotor* dan *interior permanent magnet rotor*. Sedangkan motor yang diteliti pada thesis ini termasuk dalam *surface permanent magnet rotor*. Dimensi *surface permanent magnet* meliputi ketebalan magnet dan lebar magnet. Lebar magnet harus lebih kecil dari *pole pitch*. Biasanya lebar magnet adalah sekitar 0,8-0,85 kali *pole pitch*. Ketebalan magnet harus sekecil mungkin untuk menjaga

jumlah bahan magnet permanen yang dibutuhkan. Namun, magnet harus cukup tebal untuk menghasilkan fluks magnetik pada airgap [5]. Pada penelitian ini, dimensi magnet yang digunakan adalah berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan tebal 3 mm.



Gambar 2 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen

Tabel 1 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen

| Parameter | Symbol |
|--|----------------|
| Lebar plat pada stator | a |
| Jarak pusat magnet antara stator dan rotor | b |
| Jarak titik pusat ke pusat magnet rotor | c |
| Jarak titik pusat ke plat luar | e |
| Jarak titik pusat ke plat dalam | D _r |
| Jarak titik pusat ke pusat magnet stator | D |
| Jarak air gap | δ |
| Tinggi magnet | h _M |
| Diameter magnet | l _M |
| Slot pitch | τ _u |

2. Formulasi Medan Magnetik

Hukum-hukum dasar yang mengatur medan magnetik dapat dinyatakan dengan persamaan Maxwell. Medan magnetostatik yang dapat diwakili oleh kerapatan arus hanya membutuhkan penerapan dua hukum dari keempat hukum Maxwell yang diberikan di bawah:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2)$$

dan hubungan antar unsurnya diberikan oleh:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

dimana \vec{B} adalah induksi magnetik, \vec{H} intensitas medan magnet, \vec{J} kerapatan arus, dan μ permeabilitas bahan feromagnetik. Semua material yang diambil bersifat isotropik dan homogen. Efek histeresis diabaikan, sehingga membuat karakteristik magnetisasi bernilai tunggal. Solusi dari masalah medan magnet yang mencakup arus diskrit menuntut penggunaan konsep vektor potensial. Karena perbedaan curl, dari setiap fungsi vektor adalah nol, dapat dituliskan:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

dimana \vec{A} adalah vektor potensial magnetik. Dari persamaan di atas, diperoleh:

$$\nabla \times \{v(\nabla \times \vec{A}) - \vec{J}\} = 0 \quad (5)$$

dimana ν adalah reluctivitas, didefinisikan sebagai kebalikan dari permeabilitas magnetik μ . Persamaan (5) kemudian disebut persamaan dasar potensi vector medan magnetostatik. Kondisi batas umum yang harus dipenuhi pada antarmuka media stasioner yang berbeda berasal dari bentuk integral terbatas persamaan Maxwell, dan diberikan oleh:

$$B_{n1}-B_{n2} = 0 \quad (6)$$

$$H_{t1}-H_{t2} = 0 \quad (7)$$

$$J_{n1}-J_{n2} = 0 \quad (8)$$

dimana subskrip 1 dan 2 menunjukkan media yang dipertimbangkan, dan n dan t menunjukkan komponen normal dan tangensial. Permukaan kerapatan arus J_s ada pada antarmuka, ketika salah satu daerah memiliki konduktivitas terbatas, sedemikian kasus pada persamaan (7) perlu diubah.

Pemilihan ν menjadi daerah terhubung yang tertutup, fungsi energi magnetik dalam V dapat didefinisikan sebagai:

$$F = \iiint_V \left(\int_0^B \nu \cdot b \cdot db \right) dv - \iint_V (\vec{J} \cdot \vec{A}) dv \quad (9)$$

Fungsi yang benar untuk masalah medan nonlinier adalah bahwa persamaan Euler menghasilkan persamaan diferensial parsial nonlinear (5), Memperkenalkan fungsi baru W yang mengekspresikan fungsi energi sebagai berikut:

$$\frac{dW}{d\{(\nabla \times \vec{A}) \cdot (\nabla \times \vec{A})\}} = \nu \quad (10)$$

Fungsi energi dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2} \iiint_V (W - 2\vec{J} \cdot \vec{A}) dv \quad (11)$$

Variasi pertama F harus hilang untuk F menjadi stasioner di V.

$$\delta F(\vec{A}) = 0 \quad (12)$$

Dengan menggunakan identitas vektor dan teorema divergensi, maka dapat diperoleh:

$$\delta F(\vec{A}) = \iiint_V [\nabla \times \{v(\nabla \times \vec{A})\} - \vec{J} \cdot \delta \vec{A}] dv + \iint_S \{v(\nabla \times \vec{A})\} \times \vec{n} \cdot \delta \vec{A} ds = 0 \quad (13)$$

Dari lemma fundamental dari kalkulus variasi, setiap istilah dalam tanda kurung di atas harus hilang secara independen. Sehingga:

$$\nabla \times \{v(\nabla \times \vec{A})\} - \vec{J} = 0 \text{ dalam } V \quad (14)$$

Dan

$$\{v(\nabla \times \vec{A})\} \cdot \vec{n} = 0 \text{ dalam } S \quad (15)$$

Dimana S adalah pembatas permukaan yang tertutup, V adalah volume dan \vec{n} adalah unit luar vektor normal terhadap permukaan S.

Persamaan (5) adalah persamaan Euler dari fungsi yang telah didefinisikan oleh persamaan (9) atau persamaan (11), pemenuhan jenis kondisi batas homogen Dirichlet - dan Neumann- jika tidak ada ketentuan lain. Fungsi energi dapat dipilih dalam bentuk yang dimodifikasi menjadi seperti berikut:

$$F = \frac{1}{2} \iiint_V (W - 2\vec{J} \cdot \vec{A}) dv + \iint_S \vec{C} \cdot \vec{A} ds \quad (16)$$

Sehingga untuk memenuhi syarat batas yang lebih umum:

$$\{v(\nabla \times \vec{A})\} \times \vec{n} + \vec{C} = 0 \text{ dalam } S \quad (17)$$

3. Perumusan Persamaan Finite Element

Persamaan Finite-elemen mendekati prinsip variasi menggunakan persamaan (11) yang kemudian dikembangkan. Wilayah V dibagi menjadi sub daerah dengan jumlah yang terbatas, yang disebut elemen, sehingga tidak ada dua elemen berpotongan dan penyatuan semua elemen merupakan seluruh

wilayah V dan permukaan batasnya adalah S. Untuk membaginya, bentuk yang dipilih adalah segitiga. Diasumsikan bahwa variasi A atas unsur tertentu dan permukaannya diberikan oleh:

$$\vec{A}^e(x,y,z) = \sum_i N_i A_i \quad (18)$$

Dimana indeks i adalah simpul dari prisma segitiga (1 sampai 6), dan x, y, z adalah koordinat sistem Cartesian dari persegi panjang. Dengan mensubstitusikan persamaan (18) ke dalam persamaan (11), dan turunan parsial F yang berhubungan dengan masing-masing nilai nodal harus dihilangkan, sehingga bisa didapatkan satu set persamaan aljabar nonlinier dari bentuk matriks:

$$[S] [A] = [J] \quad (19)$$

dimana S adalah koefisien simetris matriks persegi, A adalah vektor kolom, dan J adalah vektor kolom dari kerapatan arus. Untuk persamaan kuasi-linear dan eliptik seragam (5), diperoleh matrix S positif yang terikat, yang mana ikatan struktur ditentukan oleh bentuk yang dipilih untuk lokalisasi fungsi N_i [6].

4. Penghitungan Fluks Density pada Airgap

Magnet permanen yang akan digunakan pada penelitian ini adalah magnet NdFeB. Karakteristik yang paling penting untuk bahan magnet permanen adalah kerapatan fluks remanen, kekuatan medan koersif, kurva hysteresis dan produksi energi [5].

Magnet permanen NdFeB memiliki kurva demagnetization linear, dan kekuatan medan koersif pada suhu kamar hanya dapat dihitung atas dasar kerapatan fluks magnetic B_r dan permeabilitas recoil relatif $\mu_{r\text{rec}}$ sebagai:

$$H_c = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{r\text{rec}}} \quad (20)$$

Kerapatan fluks magnet yang dihasilkan dalam air gap δ oleh PM dengan kurva demagnetization linear dan tebal h_M ditempatkan di sirkuit magnetik dengan permeabilitas magnet tak berhingga dan airgap δ adalah:

$$B_\delta \approx \frac{B_r}{1 + \mu_{r\text{rec}} \delta / h_M} \quad (21)$$

Persamaan (18) diatas telah diturunkan dengan asumsi $h_c h_M \approx H_M h_M + H_g \delta$, H_c didapatkan dari persamaan (18), $H_M = B_g / (\mu_0 \mu_{r\text{rec}})$ dan $H_g = B_g / \mu_0$.

5. Metode Maxwell Stress Tensor untuk Menghitung Gaya dan Torsi Pada Motor

Untuk menghitung besarnya gaya dan torsi pada motor ini menggunakan metode Maxwell stress tensor. Penggunaan metode Maxwell stres tensor ini dikarenakan metode ini sederhana dari perspektif komputasi karena hanya memerlukan distribusi kerapatan fluks lokal sepanjang garis tertentu atau kontur [7].

Dengan menggunakan definisi Maxwell stres tensor, kekuatan gaya (force) dapat ditentukan atas dasar kepadatan fluks magnetik, sehingga gaya tangensialnya adalah:

$$F_t = \frac{L_t}{\mu_0} \int B_n B_t dl \quad (22)$$

di mana μ_0 , L_t , B_n dan B_t masing-masing secara berurutan adalah permeabilitas magnetik, panjang rotor efektif, komponen radial (normal) dari kerapatan fluks magnetik dan komponen tangensial dari kerapatan fluks magnetik.

Persamaan torsi adalah $T = r \times F$ dan hubungannya dengan persamaan (22) adalah:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \oint_i r B_n B_t dl \quad (23)$$

dimana r adalah jari-jari lingkaran yang terletak pada air gap.

Finite grid yang digunakan pada persamaan di atas adalah untuk masing-masing elemen i . Sedangkan torsi dalam koordinat silinder merupakan jumlah torsi untuk setiap elemen i , dan dinyatakan sebagai berikut:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \sum_i r^2 \oint_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} B_{ri} B_{\theta i} d\theta \quad (24)$$

6. Simulasi Berbagai Variasi

Parameter-parameter pada desain yang telah didapatkan pada sub-bab terdahulu merupakan nilai awal sebagai dasar penentuan variasi yang akan dilakukan. Sehingga nilai tersebut belum tentu menjadi nilai yang optimal. Untuk mencari nilai yang optimal dari parameter-parameter tersebut, maka dilakukan simulasi dengan variasi sebagai berikut:

Variabel kontrolnya adalah dimensi magnet permanen; Variabel manipulasinya adalah sudut kemiringan α rotor dan stator ($^\circ$), jumlah stator (buah), jumlah rotor (buah), jarak antara (*airgap*) stator dan rotor (mm), kekuatan magnet permanen (MGOe). Sedangkan variabel responnya adalah torsi yang dihasilkan (N^*m)

7. Penggabungan parameter yang Menghasilkan Torsi Maksimal

Hasil dari simulasi berbagai variasi tersebut adalah nilai torsi yang dihasilkan. Dari simulasi tersebut akan diketahui pada nilai berapa dari parameter-parameter tersebut yang bisa menghasilkan torsi paling besar. Kemudian, nilai-nilai terbaik pada tiap parameter tersebut diambil untuk digabungkan membentuk suatu desain baru yang lebih optimal.

Desain baru tersebut juga akan disimulasikan untuk mengetahui torsi yang dihasilkan. Jika torsi yang dihasilkan sudah tinggi (minimal sama dengan yang dihasilkan pada tahap sebelumnya) maka dilanjutkan ke tahap selanjutnya. Namun jika torsi yang dihasilkan malah menurun, maka dicari lagi kombinasi nilai parameter yang bisa menghasilkan torsi yang tinggi.

8. Variasi Mesh Untuk Memperoleh Hasil / Nilai yang Konvergen

Keakuratan solusi elemen hingga tergantung pada topologi mesh. Mesh merupakan bagian penting dari model elemen hingga. Software finite elemen modern dapat menghasilkan mesh secara otomatis dari garis geometrik yang digambar dari software jenis CAD. Generator mesh ini biasanya membangun mesh menggunakan metode triangulasi Delaunay [7].

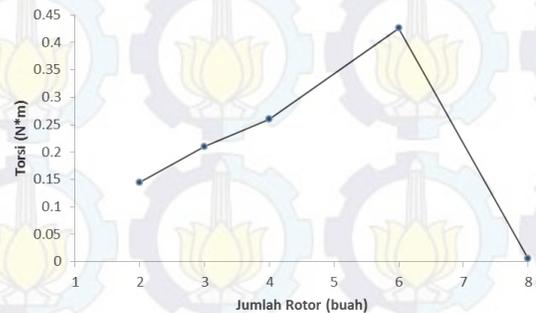
Jika desain baru yang bisa menghasilkan torsi tinggi telah didapat, maka dilakukan variasi ukuran meshing. Variasi ukuran meshing ini bertujuan untuk memastikan bahwa nilai torsi yang dihasilkan adalah sudah konvergen, sudah tidak berbeda lagi dengan hasil meshing sebelumnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Berbagai Variasi

Pada penelitian ini telah dilakukan berbagai variasi. Yang merupakan variabel manipulasinya adalah sudut kemiringan α rotor dan stator ($^\circ$), jumlah stator (buah), jumlah rotor (buah), jarak antara (*airgap*) stator dan rotor (mm).

1. Variasi Jumlah Rotor yang Digunakan

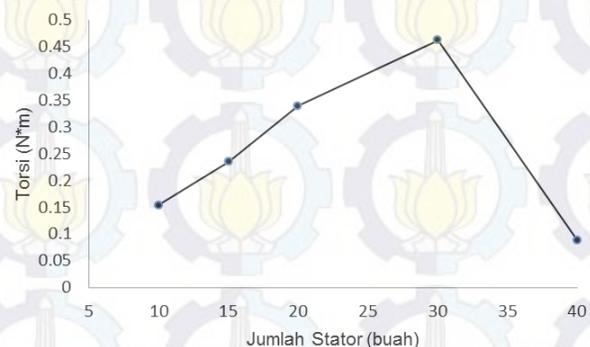


Gambar 3 Variasi jumlah rotor dan torsi yang dihasilkan. Jumlah rotor divariasikan yaitu berjumlah 2, 3, 4, 6 dan 8 buah. Sedangkan parameter yang lain menggunakan parameter awal sebagai acuan, yaitu jumlah stator 30 buah, kemiringan sudut α adalah 12° , dan jarak *airgap*-nya adalah 1 mm.

Pada grafik 4.2 terlihat bahwa variasi rotor yang berjumlah 6 buah menghasilkan torsi paling besar, yaitu mencapai 0,426 N^*m .

2. Variasi Jumlah Stator yang Digunakan

Jumlah rotor divariasikan yaitu berjumlah 10, 15, 20, 30 dan 40 buah. Rotor yang digunakan adalah sebanyak 6 buah, karena dari hasil simulasi sebelumnya diketahui bahwa jumlah inilah yang bisa menghasilkan torsi paling besar dibandingkan dengan yang lainnya.



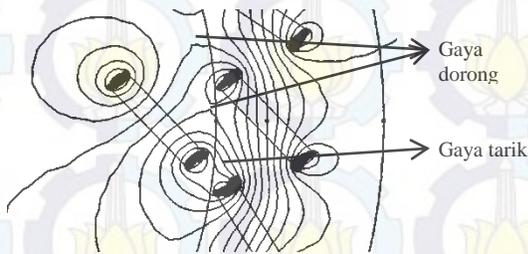
Gambar 4 Variasi jumlah stator dan torsi yang dihasilkan. Grafik 4 menampilkan hasil simulasi dari variasi jumlah stator yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa torsi yang dihasilkan semakin bertambah seiring bertambahnya jumlah stator yang digunakan, hingga mencapai puncaknya ketika stator berjumlah 30 buah, namun setelah itu torsi yang dihasilkan menurun.

3. Variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor

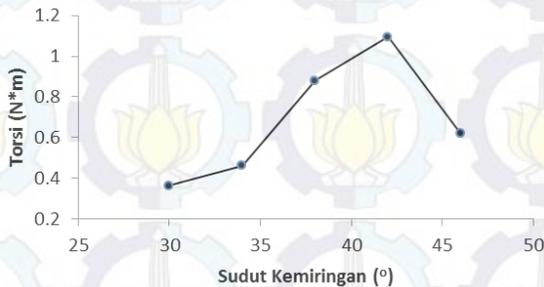
Sudut kemiringan sangat berpengaruh kepada torsi yang dihasilkan, karena sudut kemiringan sangat berpengaruh terhadap arah gaya magnet yang dihasilkan. Jika arahnya

medan magnetnya tepat, maka kekuatan medan magnet akan lebih optimal dalam menghasilkan torsi. Untuk mengetahui sudut berapa yang tepat untuk digunakan pada desain motor ini, maka perlu disimulasikan dengan berbagai variasi sudut. Pada desainnya Brady, digunakan sudut 34° pada motornya. Untuk itu, sudut kemiringan (α) stator dan rotor divariasikan mulai sudut 30° dengan interval 4° yaitu sebesar 30° , 34° , 38° , 42° dan 46° .

Gambar 5 merupakan sebaran fluks magnetik dengan variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor sebesar 42° . Torsi yang dihasilkan adalah $1,094 \text{ N}\cdot\text{m}$. Sudut sebesar 42° ini menghasilkan nilai torsi yang paling besar diantara variasi yang lainnya. Hal ini dikarenakan bidang magnet yang saling tolak-menolak memiliki daerah kontak yang banyak dibandingkan dengan desain dengan sudut lain. Sehingga daya tolaknya lebih optimal. Selain daya tolak, motor ini masih dipengaruhi gaya tarik, namun pada desain ini dengan sudut kemiringan 42° , bidang yang saling tarik menarik, tepat pada sisi samping magnet, sehingga daya tarik magnetnya tidak begitu kuat. Hal ini lebih mengoptimalkan torsi yang dihasilkan.



Gambar 5 Sebaran fluks magnetik pada variasi sudut 42°



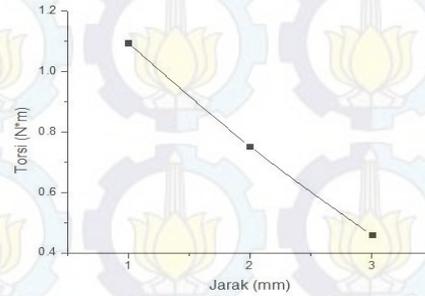
Gambar 6 Variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor, serta torsi yang dihasilkan

Grafik 6 menampilkan hasil simulasi dari variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa torsi yang dihasilkan semakin bertambah seiring bertambahnya sudut kemiringan, hingga mencapai puncaknya ketika sudut sebesar 42° , namun setelah itu torsi yang dihasilkan menurun.

4. Variasi jarak airgap antara stator dan rotor

Untuk mengetahui pada jarak airgap berapa tepat untuk digunakan pada desain motor ini, maka perlu disimulasikan dengan berbagai jarak airgap. Jarak airgap antara stator dan rotor divariasikan sebesar 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Dimulai dengan jarak 1 mm karena jika lebih kecil dari 1 mm maka pembuatannya akan kesulitan, karena akan dibutuhkan peralatan dengan presisi tinggi.

Grafik 7 menampilkan hasil simulasi dari variasi jarak airgap antara stator dan rotor yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa semakin bertambah jarak airgapnya, maka torsi yang dihasilkan semakin berkurang.



Gambar 7 Variasi jarak antara (airgap) stator dan rotor, serta torsi yang dihasilkan

5. Variasi Susunan Magnet Halbach Array

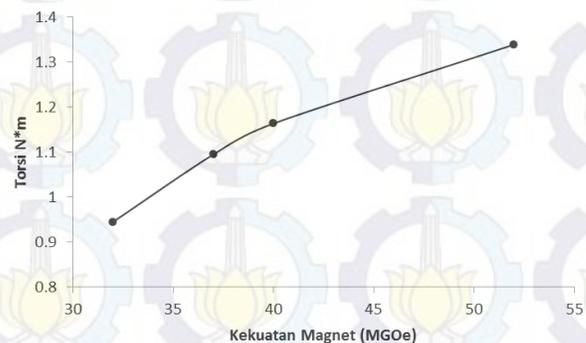
Susunan magnet halbach array bisa menguatkan medan magnet yang dihasilkan. Namun untuk mengetahui, apakah juga bisa meningkatkan torsi yang dihasilkan pada motor bertenaga magnet ini, maka dilakukan simulasi terhadap variasi susunan magnet halbach array, yaitu arah magnetnya berselang-seling.

Setelah dilakukan simulasi, ternyata desain motor dengan menggunakan susunan magnet halbach array hanya menghasilkan torsi sebesar $0,0116 \text{ N}\cdot\text{m}$. Torsi yang dihasilkan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan susunan magnet yang searah dan saling berhadap-hadapan. Hal ini disebabkan karena setiap rotor dipengaruhi oleh gaya tarik dengan stator yang besar. Sehingga sangat menghambat pergerakan rotor.

6. Variasi Kekuatan Magnet

Untuk mengetahui pengaruh kekuatan magnet (H) terhadap torsi yang dihasilkan, maka perlu disimulasikan dengan berbagai kekuatan medan magnet. Variasi ini diambil pada list material magnet yang sudah tersedia pada software FEMM 4.2, yaitu; 32 MGOe, 37 MGOe, 40 MGOe dan 52 MGOe.

Setelah dilakukan simulasi, ternyata penambahan kekuatan magnet yang digunakan berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin besar kekuatan magnet yang digunakan, maka semakin besar torsi yang dihasilkan. Seperti terlihat pada gambar 8. Torsi terbesar dihasilkan oleh magnet yang berkekuatan 52 MGOe, yaitu sebesar $1,33 \text{ N}\cdot\text{m}$.



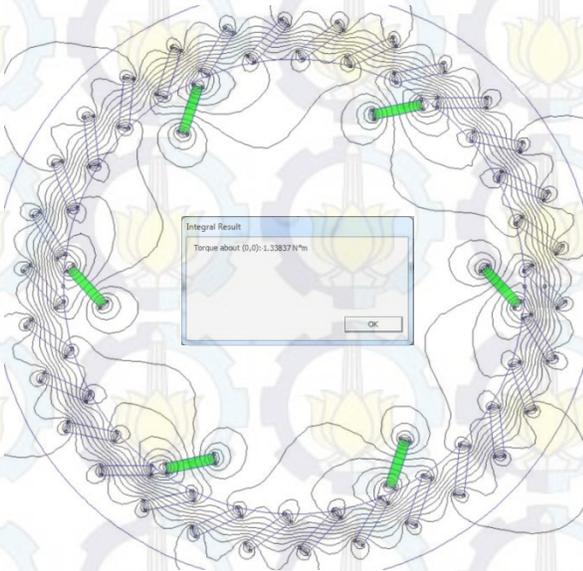
Gambar 8 Variasi Kekuatan Magnet dan Torsi yang Dihasilkan

B. Desain Akhir yang Dhasilkan

Setelah dilakukan simulasi dengan berbagai variasi, maka didapatkan nilai-nilai dari parameter yang bisa menghasilkan torsi yang maksimal. Berikut ini merupakan nilai-nilai tersebut; sudut kemiringan α rotor dan stator 42° , Jumlah stator 30 buah (jarak antar magnet 12°), Jumlah rotor 6 buah (jarak antar magnet 6°), Jarak antara (*airgap*) stator dan rotor: 1 mm, Arah magnet Searah, Kekuatan magnet neomydium , 52 MGOe.

Nilai-nilai tersebut kemudian digabungkan menjadi satu desain dalam motor bertenaga magnet permanen. Gambar 4.10 berikut ini merupakan desain berdasarkan parameter-parameter tersebut.

Untuk mengecek apakah setelah penggabungan, torsi yang dihasilkan akan mengalami penurunan atau minimal sama dengan yang dihasilkan sebelumnya maka dilakukan simulasi kembali dengan parameter-parameter yang telah disebutkan tadi. Gambar 9 merupakan hasil simulasinya. Torsi yang dihasilkan ternyata tidak mengalami penurunan, yaitu sebesar 1,3383 N*m. Sehingga bisa disimpulkan bahwa nilai-nilai dari parameter-parameter tersebut merupakan nilai yang sudah optimal.



Gambar 9. Hasil simulasi desain hasil penggabungan parameter yang optimal

C. Hasil dari Variasi mesh

Untuk mendapatkan hasil yang lebih valid, maka ukuran mesh divariasikan. Ukuran mesh dibuat lebih kecil selama komputernya masih bisa meng-iterasi-kan. Pada simulasi sebelumnya, ukuran mesh dibuat default dari software-nya, artinya tidak dirubah-rubah. Untuk variasi mesh ini, ukuran meshnya divariasikan dari ukuran default; 0,7; 0,5 dan 0,4. Dibawah 0,4, proses pembentukan meshing dan proses iterasi berjalan sangat lama, dan hasil torsi yang dihasilkan sudah tidak berubah secara signifikan, sehingga variasi mesh dihentikan sampai ukuran 0,4.

Tabel 2. Data variasi ukuran mesh

| No | Ukuran Mesh | Jumlah Nodes | Jumlah Element | Torsi (N*m) |
|----|-------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | Default | 29695 | 59428 | 1,0943 |
| 2 | 0,7 | 60318 | 119916 | 1,1158 |
| 3 | 0,5 | 120701 | 241040 | 1,1168 |
| 4 | 0,4 | 141180 | 281317 | 1.1150 |

Jumlah nodes dan element yang dihasilkan pada setiap variasi ukuran mesh bisa dilihat pada tabel 2. Pada tabel tersebut juga ditampilkan nilai torsi yang dihasilkan.

Ukuran mesh yang semakin kecil, mengakibatkan proses iterasi lebih lama namun hasil yang dihasilkan lebih teliti/kontinyu karena titik perhitungannya lebih banyak.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi terhadap desain motor bertenaga magnet permanen dengan berbagai variasi parameter. Berdasarkan simulasi tersebut, didapatkan desain motor bertenaga magnet permanen yang bisa menghasilkan torsi sebesar 1,3383 N*m, dengan nilai parameter sebagai berikut: Sudut kemiringan α rotor dan stator 42° , Jumlah stator 30 buah (jarak antar magnet 12°), Jumlah rotor 6 buah (jarak antar magnet 6°), Jarak antara (*airgap*) stator dan rotor : 1 mm, Arah magnet Searah, Kekuatan magnet neomydium , 52 MGOe.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi (DIKTI) yang telah memberikan Beasiswa Unggulan tahun 2012-2014. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Pertamina Foundation yang telah memberikan pendanaan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Waide, Paul. 2011. *Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems*. France: International Energy Agency.
- [2] Melfi, Michael and S.David Rogers. *Permanent-Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications*. IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 44, no. 5, pp. 1360-1366, Sept./Oct. 2008. Standard
- [3] Brady, Mike. (2006). Patent No. WO 2006/045333 A1. Germany.
- [4] Xia Li, Ling Xia, Wufan Chen, Feng Liu, Stuart Crozier, Dexin Xie. *Finite element analysis of gradient z-coil induced eddy currents in a permanent MRI magnet*. Elsevier Journal of Magnetic Resonance, vol. 208, pp. 148-155. November 2010.
- [5] Manninen, Aino. 2012. *Evaluation of the effects of design choices on surface mounted permanent magnet machines using an analytical dimensioning tool*. Master's Thesis in the Aalto-University School Of Electrical Engineering.
- [6] Sarma, Mulukutla S. 1976. *Magnetostatic field computation by finite element formulation*. Electrical and Computer Engineering Faculty Publications. Northeastern University.
- [7] Gieras, Jacek F. 2010. *Permanent Magnet Technology, Design and Application*. United States: CRC Press.