

Simulasi Distribusi Fluks dan Tegangan Generator Magnet Permanen Satu-Fasa Hasil Modifikasi Motor Induksi Rotor Sangkar Satu-Fasa

I MADE WIWIT KASTAWAN, RAHMAT HIDAYAT

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Indonesia
Email: wiwit.kastawan@polban.ac.id

Received 14 Juni 2024 | Revised 20 Juli 2024 | Accepted 22 Juli 2024

ABSTRAK

Modifikasi motor induksi rotor sangkar satu-fasa (MI) menjadi generator magnet permanen satu-fasa (GMP) memberi manfaat seperti re-use MI bekas serta aplikasinya untuk memanen potensi energi hidro sungai kecil berelevasi rendah. Modifikasi diawali dengan pembongkaran MI untuk memperoleh ukuran bagian-bagian utamanya. Berdasarkan ukuran rotor, sejumlah kutub-kutub magnet permanen ditanamkan. Rewinding belitan stator dilakukan berdasarkan jumlah dan ukuran slot. Rancangan GMP ini kemudian disimulasikan dengan Magnet Infolytica untuk menampilkan distribusi fluks dan pembangkitan tegangannya. Simulasi ini menggunakan metode elemen hingga dengan tahapan yaitu pemodelan dan inisiasi rancangan GMP, pengaturan mesh, pengaturan winding dan pengaturan motion. Hasilnya menunjukkan distribusi fluks yang tidak merata yaitu 0 – 0,6438 T (rendah), 0,6438 – 1,2876 T (sedang) dan 1,2876 – 1,6095 T (tinggi). Tegangan keluaran yang dihasilkan adalah non-sinusoidal dengan magnituda 112,33 V dan THD 5,89% pada kondisi tanpa beban dan putaran penggerak 750 rpm.

Kata kunci: distribusi fluks, GMP, MI, pembangkitan tegangan, THD.

ABSTRACT

Modification of single-phase squirrel cage induction motor (IM) into single-phase permanent magnet generator (PMG) gives benefits such as re-use of wasted IM and its application for harvesting hydro energy potential of low-elevation river. Firstly, the IM is disassembled to get all main components dimension. Based on rotor dimension, permanent magnet poles are implanted. Rewinding of stator windings is done according to number and dimension of the slots. Then, PMG design is simulated by Magnet Infolytica to get flux distribution and voltage generation profiles. The simulation is based on finite element method, consisted of modelling and initiation of PMG design as well as mesh, winding and motion settings. The results show non-uniform flux distribution i.e. 0 – 0.6438 T (low), 0.6438 – 1.2876 T (medium) and 1.2876 – 1.6095 T (high). Output voltage generated is non-sinusoidal with magnitude of 112.33 V and THD of 5.89% under no-load condition and 750 rpm of prime mover rotation.

Keywords: flux distribution, PMG, IM, voltage generation, THD.

1. PENDAHULUAN

Saat ini listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat diperlukan dalam kehidupan masyarakat. Energi listrik umumnya dibangkitkan dengan cara mengkonversi energi mekanik putaran menjadi energi listrik menggunakan peralatan yang dikenal dengan nama generator. Energi mekanik putaran sebagai penggerak utama (*prime mover*) generator dapat merupakan turbin yang digerakkan oleh uap (PLTU), gas (PLTG), air (PLTA) dan lain sebagainya (**Theraja, 2014**). Untuk kapasitas daya yang kecil, generator dapat dikonstruksi dengan relatif mudah, salah satunya dengan cara memodifikasi motor induksi satu-fasa, khususnya yang berjenis rotor sangkar. Generator ini umumnya merupakan generator magnet permanen yang dapat bekerja pada penggerak dengan daya kecil dan putaran rendah. Secara umum, motor listrik dapat dimodifikasi menjadi generator karena mempunyai konstruksi yang hampir mirip. Diantara berbagai jenis motor listrik, motor induksi rotor sangkar satu-fasa (disingkat MI) sangat banyak dijumpai penggunaannya pada berbagai peralatan listrik rumah tangga dan industri seperti pompa air, mesin cuci, kompresor, mesin pengering dan lain sebagainya (**Raja & Kapo, 2017**), (**Saputra, 2014**). Sejatinya MI dapat dengan mudah dijadikan generator hanya dengan menambahkan kapasitor pada belitan stator. Namun, cara ini hanya dapat dilakukan apabila mesin dioperasikan terlebih dahulu sebagai motor (**Theraja, 2014**). Cara lainnya adalah memodifikasinya menjadi generator magnet permanen (disingkat GMP) dengan menempatkan kutub-kutub magnet permanen pada rotornya. GMP yang diperoleh dari hasil modifikasi MI memiliki keuntungan seperti pemanfaatan ulang MI bekas dengan mengingat bahwa motor ini sangat banyak dijumpai penggunaannya di sektor rumah tangga, industri dan gedung-gedung perkantoran/komersial sehingga akan banyak pula MI bekas yang dapat dimanfaatkan ulang. Keuntungan lainnya adalah GMP yang dihasilkan memiliki kemampuan untuk bekerja pada putaran rendah sehingga sangat cocok untuk digunakan memanen energi potensial dari sungai-sungai kecil berelevasi rendah, energi angin dan lain-sebagainya (**Kastawan, dkk, 2022**), (**Setyawan, dkk, 2020**), (**Irfan, dkk, 2018**), (**Fikri, dkk, 2022**).

Fluks/medan magnet diperlukan agar proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik dapat terjadi pada sebuah generator. Secara garis besar, pembangkitan fluks magnet pada rotor dapat dilakukan dengan menggunakan belitan (dikenal sebagai belitan rotor atau belitan eksitasi) yang terhubung dengan sebuah sumber dc eksternal atau dengan menggunakan magnet permanen sehingga tidak memerlukan sumber dc eksternal (**Theraja, 2014**). MI memiliki rotor berupa batang-batang konduktor yang terhubung singkat melalui cincin konduktor di masing-masing ujungnya. Tidak terdapat belitan pada rotor MI. Oleh karenanya modifikasi MI menjadi GMP dapat dilakukan dengan menanamkan kutub-kutub magnet permanen di rotornya. Generator yang menggunakan magnet permanen akan memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada generator dengan belitan eksitasi karena tidak ada rugi-rugi daya yang dihasilkan oleh belitan eksitasi (**Theraja, 2014**). Keuntungan lain dari penggunaan kutub magnet permanen adalah fluks dapat dihasilkan sendiri tanpa memerlukan penggunaan sumber eksitasi dc sehingga generatornya menjadi sangat cocok untuk digunakan pada daerah-daerah terisolasi yang belum terhubung ke jaringan listrik eksisting. Terkait material dari kutub-kutub magnet permanen, Neodymium Iron Boron (disingkat NdFeB) merupakan jenis material yang paling sering digunakan untuk rancangan GMP. Sifat kemagnetan yang dimiliki NdFeB lebih tinggi apabila dibandingkan dengan jenis material kutub-kutub magnet permanen lainnya (**Bell, 2023**).

Distribusi fluks yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet permanen merupakan salah satu faktor yang menentukan profil tegangan keluaran GMP, ditinjau dari aspek magnituda dan bentuk gelombangnya. Secara umum, GMP akan menghasilkan tegangan keluaran dengan

magnituda maksimum dan bentuk gelombang mendekati sinusoidal murni apabila fluksnya terdistribusi secara merata pada inti stator dimana belitan jangkar GMP terpasang (**Amin, dkk, 2022**), (**Eldoromi, dkk, 2018**). Distribusi fluks ditentukan oleh jenis, ukuran dan jumlah kutub magnet permanen yang digunakan serta jumlah slot dan pola belitan jangkar yang ditempatkan pada slot. Simulasi dapat membantu melihat distribusi fluks yang dihasilkan sebagai variasi dari jenis, ukuran dan jumlah kutub magnet permanen yang digunakan serta jumlah slot dan pola belitan jangkar yang ditempatkan pada slot. Oleh karenanya langkah simulasi penting dilakukan untuk mengetahui apakah fluks yang dibangkitkan oleh kutub-kutub magnet permanen yang terpasang telah terdistribusi secara merata atau belum pada inti stator GMP.

Hasil kajian terhadap literatur-literatur terkait menunjukkan berbagai upaya yang telah dilakukan terkait pengembangan rancangan GMP, khususnya GMP yang diperoleh proses modifikasi MI. Salah satunya adalah rancang bangun GMP dengan memodifikasi MI yang dapat membangkitkan tegangan keluaran ac satu-fasa dengan nilai tertentu namun memiliki bentuk gelombang tegangan non-sinusoidal (belum mendekati bentuk gelombang tegangan sinusoidal murni) dengan kandungan harmonik yang relatif tinggi yang dapat dilihat dari persentase nilai total harmonic distortion (THD) (**Kastawan, dkk, 2021**), (**Prasetia, 2023**). Kajian pengembangan lainnya adalah rancang bangun GMP sebagai hasil modifikasi dari MI yang biasa digunakan pada penggerak kipas dan pompa air (**Nugroho, 2016**), (**Handika, 2023**). Jenis generator magnet permanen lain yang cukup banyak dikembangkan adalah tipe fluks aksial (*axial flux permanent magnet* disingkat AFPM) yang dikenal juga sebagai generator magnet permanen rotor piring. Hasil studi literatur menunjukkan berbagai aplikasi dari AFPM generator ini, terutama untuk pembangkit listrik pico dan mikro hidro, pembangkit listrik angin atau bahkan sepeda stasioner yang terhubung pada penggerak/turbin putaran rendah (**Wirtayasa, dkk, 2017**), (**Di Dio, dkk, 2022**), (**Hatziargyriou, 2014**), (**Ahmed, dkk, 2014**), (**Chung & You, 2014**), (**Hlaing, 2018**). Secara umum keuntungan dari AFPM generator adalah konstruksinya yang lebih sederhana. Namun, AFPM umumnya memiliki ukuran yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan GMP hasil modifikasi MI sehingga kurang cocok untuk aplikasi yang menginginkan ukuran generator yang kecil (**Chavan & Bapat, 2016**). Dengan mempertimbangkan rencana kajian selanjutnya dari penulis yaitu aplikasi generator magnet permanen pada sebuah sistem pembangkit tenaga listrik berkapasitas daya kecil yang dapat dengan mudah dibawa dan dipindah-pindahkan lokasi instalasinya (*portable*) maka GMP sebagai hasil modifikasi MI dipandang lebih sesuai dan menarik untuk dikembangkan lebih lanjut.

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan rancangan GMP hasil modifikasi MI yang telah dilakukan dalam kegiatan penelitian sebelumnya yang telah berhasil membangkitkan tegangan keluaran ac satu-fasa dengan nilai tertentu namun masih memiliki bentuk gelombang tegangan non-sinusoidal (**Kastawan, dkk, 2021**), (**Prasetia, 2023**). Dengan mensimulasikannya akan dapat diketahui apakah rancangan GMP tersebut, dengan jenis, ukuran dan jumlah kutub magnet permanen yang terpasang serta jumlah slot dan pola belitan jangkar yang dibuat, dapat menghasilkan distribusi fluks yang merata atau tidak. Akar masalah yang mengakibatkan belum dihasilkannya gelombang tegangan keluaran sinusoidal murni akan dapat diungkap sehingga untuk selanjutnya dapat dilakukan perbaikan terhadap rancangan GMP. Perancangan GMP hasil modifikasi MI yang berdasarkan pada kajian distribusi fluks ini merupakan keunggulan/kelebihan dari kegiatan penelitian ini, yang belum dilakukan dalam kegiatan penelitian sebelumnya. Simulasi untuk memperoleh profil distribusi fluks dan tegangan dari rancangan GMP ini dilakukan dengan perangkat lunak Magnet Infolytica. Simulasinya secara umum akan terdiri dari tiga tahapan utama yaitu perancangan, pemodelan, dan simulasi.

2. METODE

2.1 Perancangan MI menjadi GMP

- a. Penentuan derajat kutub magnet permanen dan derajat slot belitan stator. Derajat kutub magnet permanen (θ_p) maupun derajat slot belitan stator (θ_s) diperlukan dalam pemodelan rancangan generator. Nilai untuk derajat kutub magnet permanen dan derajat slot belitan stator adalah berhubungan erat dengan jumlah kutub (n_p) dan jumlah slot stator (n_s) sesuai dengan Persamaan (1) dan (2) di bawah ini.

$$\theta_p = \frac{(2.\pi)}{n_p} \quad (1)$$

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{n_s} \quad (2)$$

- b. Penentuan kuat fluks kutub magnet permanen. Untuk memperoleh kuat fluks magnet optimal maka penting untuk menentukan ukuran dan polaritas dari kutub magnet permanen yang digunakan. Nilai atau kuat fluks magnet (ϕ) dapat ditentukan berdasarkan luas area medan magnet (A_{magn}) dan kerapatan fluks magnet maksimum (B_{maks}) sesuai Persamaan (3), (4) dan (5) berikut ini (**Lumbantoruan, 2022**).

$$A_{magn} = \frac{\pi(ro^2 - ri^2) - \tau_f(ro - ri)n_p}{n_p} \quad (3)$$

$$B_{maks} = B_r \frac{l_m}{\delta \times l_m} \quad (4)$$

$$\phi = B_{maks} \times A_{magn} \quad (5)$$

Radius luar magnet (r_o), radius dalam magnet (r_i) dan tinggi magnet (l_m) diperoleh ketika rancangan generator sudah dimodelkan. Adapun (B_r) merupakan kerapatan medan magnet relatif dengan satuan T (Tesla) yang nilainya dapat diperoleh dari data properties magnet permanen yang digunakan.

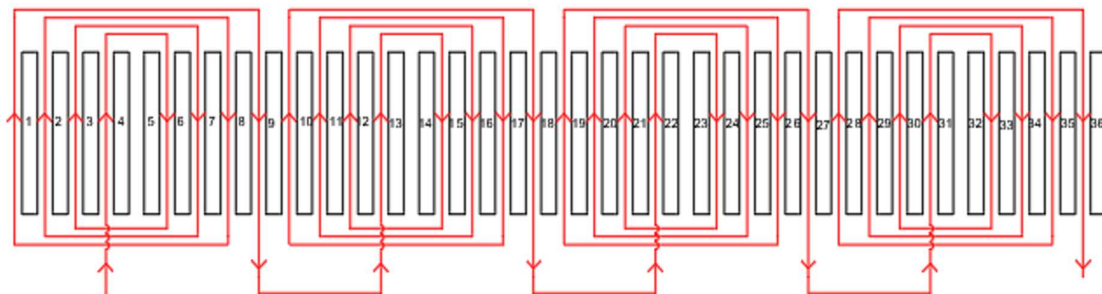
- c. Penentuan gaya gerak listrik (ggl) induksi yang dibangkitkan GMP. Ggl induksi (E_{rms}) yang dihasilkan GMP adalah bergantung pada jumlah dan arah belitan stator generator. Oleh karenanya untuk mendapatkan ggl induksi yang lebih besar maka modifikasi untuk belitan stator generator dapat dilakukan dengan cara menyesuaikan jumlah belitan stator (N_s), jumlah lilitan untuk setiap belitan stator (N) serta dan jumlah fasa belitan stator (N_{ph}). Dengan demikian MI yang dimodifikasi menjadi GMP akan memiliki kemampuan pembangkitan ggl induksi yang lebih baik. Ggl induksi GMP sendiri dapat dihitung melalui Persamaan (6) dibawah ini (**Theraja, 2014**).

$$E_{rms} = 4,44 \times N \times f \times \phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (6)$$

- d. Penentuan material kutub magnet permanen. Kutub magnet permanen yang digunakan terbuat dari material NdFeB (Neodymium Iron Boron) dengan grade atau tipe N50. Pertimbangan pemilihan material kutub magnet permanen ini adalah kemudahan untuk memerolehnya di pasar penjualan Indonesia. Pertimbangan lainnya adalah karakteristik sifat kemagnetannya yang kuat dengan harga yang cukup terjangkau. Kutub magnet permanen NdFeB tipe N50 mempunyai sifat medan magnet relatif sebesar 1.425 mT atau 1,425 T (**Bell, 2023**).

- e. Penggulungan ulang (*rewinding*) stator. Penggulungan ulang stator sangatlah penting dilakukan karena berkaitan dengan kemampuan pembangkitan ggl induksi/tegangan, arus dan daya yang dihasilkan GMP. Modifikasi belitan stator yang tidak tepat dapat menghasilkan ggl induksi/tegangan keluaran yang justru lebih kecil sebagai akibat adanya belitan yang tidak searah yang dapat saling mengurangi total nilai ggl induksi/tegangan keluaran GMP. Untuk menentukan belitan (*winding*) pada stator generator maka langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan luas penampang dan jumlah lilitan yang digunakan. Luas penampang dan jumlah lilitan ini sangat berpengaruh terhadap nilai kemampuan hantar arus (KHA) tembaga. Selain itu, luas penampang dari lilitan tembaga yang digunakan sangat berpengaruh terhadap resistansi belitan stator. Dalam perancangan GMP ini, luas penampang tembaganya adalah yang bersesuaian dengan diameter tembaga yang digunakan sebesar 0.5 mm. Penggunaan tembaga dengan ukuran diameter tersebut adalah berdasarkan pertimbangan resistansi belitan stator yang akan dihasilkan serta maksimal jumlah lilitan dalam satu slot sehingga arus yang akan melaluinya tidak menghasilkan rugi-rugi tembaga/belitan stator yang tinggi.

Gambar 1 di bawah ini menampilkan skema/pola hubungan belitan stator yang dibentuk dengan menggunakan konfigurasi 4 belitan stator untuk 1 belitan fasa. Jumlah lilitan untuk setiap belitannya adalah 150 lilitan sehingga total akan diperoleh sebanyak 600 lilitan. Belitan stator utama yang dimodifikasi berjenis lilitan terpusat dengan arah aliran arus yang searah dan setiap belitan dihubungkan secara seri. Setiap belitan akan menggunakan 4 pasang alur slot sehingga total untuk setiap belitan menggunakan sebanyak 9 slot dengan terdapat 1 slot kosong. Belitan ke-1 menggunakan slot nomor 1-9, belitan ke-2 menggunakan slot no 10-17, belitan ke-3 menggunakan slot 18-26 dan belitan ke-4 menggunakan slot 27-36.

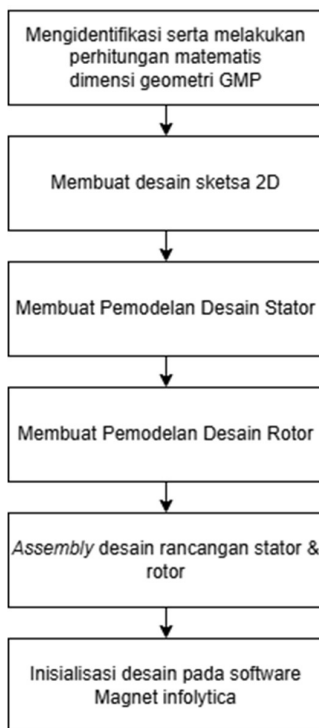


Gambar 1. Pola Belitan Stator GMP

2.2 Pemodelan Rancangan GMP

Pemodelan rancangan GMP dilakukan melalui beberapa tahapan seperti ditunjukkan oleh blok diagram pada Gambar 2.

Simulasi Distribusi Fluks dan Tegangan Generator Magnet Permanen Satu-Fasa Hasil Modifikasi Motor Induksi Rotor Sangkar Satu-Fasa



Gambar 2. Blok Diagram Langkah-Langkah Pemodelan Rancangan GMP

Secara berurutan, penjelasan terkait langkah-langkah pemodelan rancangan GMP tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Data geometri/dimensi diperlukan untuk perhitungan awal modifikasi MI menjadi generator pada perangkat SolidWorks dan Magnet Infolytica sehingga dapat dilakukan pemodelan serta simulasi. Data geometri diperoleh dari pengukuran langsung terhadap unit MI yang dimodifikasi menjadi GMP atau dari perhitungan dan perencanaan. Adapun data geometri rancangan GMP adalah sebagaimana tertera dalam Tabel 1 di bawah ini.

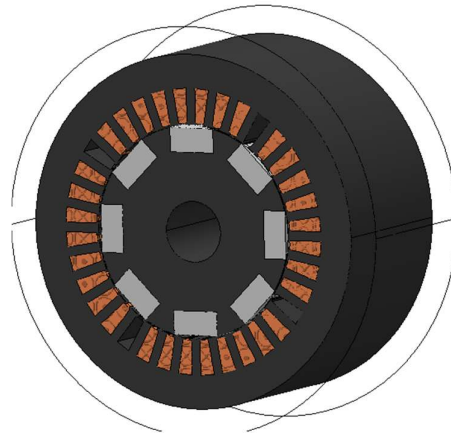
Tabel 1. Dimensi Rancangan GMP

Nama bagian/komponen GMP	Ukuran	Satuan
Jumlah slot	36	Buah
Jumlah kutub	8	Buah
Tebal stator	74,35	mm
Diameter luar stator	146,90	mm
Diameter dalam stator	118,80	mm
Diameter rotor	87,75	mm
Panjang rotor	74,35	mm
Lebar teeth	8,00	mm
Tinggi teeth	30,00	mm
Celah udara (air gap)	1,05	mm
Kutub magnet permanen NdFeB	70,00 x 20,00 x 10,00	mm

- b. Sketsa dua dimensi (2D) digunakan sebagai rancangan awal model GMP sebelum dimodelkan dalam bentuk yang lebih lengkap. Tujuannya adalah untuk mendemonstrasikan dimensi geometri hasil perhitungan agar mempermudah dalam pemodelan desain secara lengkap.

- c. Desain stator dimodelkan secara tiga dimensi (3D) sesuai dengan data geometri/dimensi yang telah ditentukan. Untuk rancangan GMP ini, desain stator dimodelkan memiliki 36 slot untuk penempatan belitan stator.
- d. Desain rotor GMP pada penelitian ini dimodelkan dengan pemasangan sebanyak 8 kutub magnet permanen yang memiliki dimensi seperti tertera pada Tabel 1 di atas. Tipe pemasangannya adalah surface permanent magnet, dimana posisi magnet berada pada permukaan rotor.
- e. Assembly desain stator dan rotor merupakan tahap perakitan masing-masing desain pemodelan stator dan rotor tersebut.
- f. Inisialisasi desain pada perangkat lunak Magnet infolytica merupakan proses penentuan material inti stator, inti rotor, kutub magnet permanen serta material pada bagian lainnya. Selain itu dilakukan juga langkah inisialisasi kutub magnet permanen serta desain/pola belitan yang digunakan sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 1.

Setelah langkah-langkah tersebut dilaksanakan maka akan dapat diperoleh model rancangan GMP seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 di bawah ini.

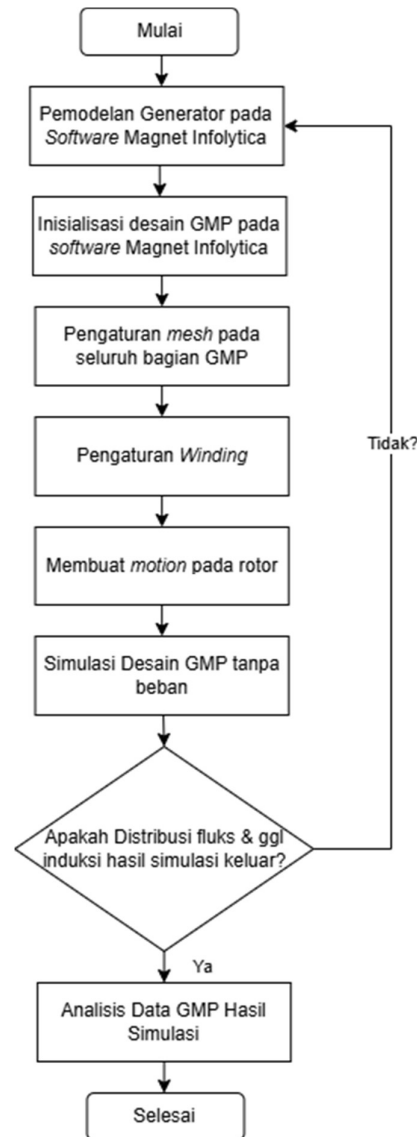


Gambar 3. Model Rancangan GMP

2.3 Simulasi Rancangan GMP

Setelah memperoleh model dari rancangan GMP maka dilakukan langkah simulasi dengan perangkat lunak Magnet Infolytica. Tujuan simulasi ini adalah untuk memperoleh profil distribusi fluks serta kemampuan pembangkitan ggl induksi/tegangan keluaran rancangan GMP dalam kondisi tanpa beban. Tahap-tahap simulasi yang harus dijalankan adalah sebagaimana ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 4 berikut ini.

Simulasi Distribusi Fluks dan Tegangan Generator Magnet Permanen Satu-Fasa Hasil Modifikasi Motor Induksi Rotor Sangkar Satu-Fasa



Gambar 4. Diagram Alir Tahap-Tahap Simulasi GMP Menggunakan Perangkat Lunak Magnet Infolytica.

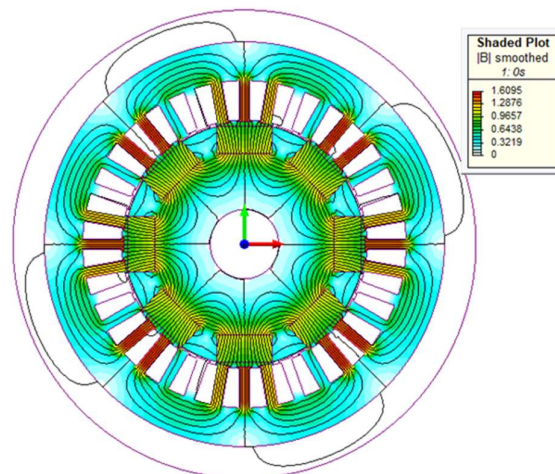
Penjelasan terkait langkah-langkah simulasi rancangan GMP tersebut di atas diberikan dalam poin-poin berikut ini:

- Pemodelan rancangan GMP pada perangkat lunak Magnet Infolytica.
Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Pemodelan yang akan dilakukan adalah rancangan GMP dengan kombinasi 36 slot dan 8 buah kutub magnet permanen.
- Inisialisasi rancangan GMP.
Rancangan GMP diinisialisasi melalui perangkat Magnet Infolytica yang meliputi penentuan jenis material inti stator, inti rotor, belitan jangkar stator, kutub magnet permanen dan celah udara serta ketebalan material yang telah ditentukan sesuai data pada Tabel 1.
- Pengaturan mesh pada seluruh bagian GMP
Pengaturan mesh berhubungan erat dengan prinsip kerja perangkat lunak Magnet Infolytica yang digunakan yaitu berdasarkan metode elemen hingga (Finite Element Method,

- disingkat FEM). Proses meshing akan mempengaruhi tingkat keakuratan dari hasil simulasi. Seluruh bagian dari model rancangan GMP akan dibagi menjadi elemen-elemen kecil berbentuk segitiga dengan ukuran maksimum 2 mm.
- d. Pengaturan belitan jangkar stator (winding).
Pengaturan belitan jangkar stator pada slot yang jumlahnya banyak, seperti pada rancangan GMP ini yang memiliki 36 slot, umumnya menggunakan tipe distributed winding. Pada tipe ini, sebuah belitan jangkar stator akan diletakan pada beberapa slot yang dimaksudkan untuk menghasilkan distribusi fluks yang lebih merata di sekitar stator.
 - e. Membuat motion pada rotor.
Untuk rancangan GMP pada penelitian ini, rotor diberikan motion berupa kecepatan putar sebesar 750 rpm. Kecepatan putaran ini diperlukan untuk menghasilkan ggl induksi/tegangan keluaran dengan frekuensi 50 Hz.
 - f. Simulasi rancangan GMP dalam kondisi tanpa beban.
Pada tahapan simulasi tanpa beban ini, keluaran yang diperoleh adalah profil distribusi fluks serta ggl induksi/tegangan keluaran yang dapat dibangkitkan oleh rancangan GMP.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan simulasi dalam kondisi tanpa beban maka akan dapat diperoleh distribusi fluks serta nilai dan bentuk gelombang ggl induksi/tegangan keluaran dari rancangan GMP yang telah dibuat. Gambar 5 di bawah ini menampilkan distribusi fluks dari rancangan GMP yang telah disimulasikan.



Gambar 5. Distribusi Fluks Rancangan GMP

Terlihat bahwa distribusi fluks rancangan GMP tidak merata/seragam di setiap bagian inti stator. Fluks yang dibangkitkan oleh 8 buah kutub magnet yang ditanamkan di rotor hanya menumpuk di beberapa bagian tertentu inti stator, sementara di bagian inti stator lainnya fluks yang melintasinya lebih sedikit atau bahkan tidak ada. Beberapa bagian inti stator dilintasi oleh fluks dengan kerapatan tinggi (ditandai oleh warna merah) dengan nilai berkisar 1,2876 – 1,6095 T. Sementara itu, beberapa bagian inti stator yang lain dilintasi oleh fluks dengan kerapatan sedang (ditandai oleh warna kuning) dan kerapatan rendah (ditandai oleh warna biru/putih) yang nilainya masing-masing berkisar 0,6438 – 1,2876 T dan 0 – 0,6438 T. Modifikasi MI menjadi GMP yang memiliki dimensi seperti ditunjukkan oleh Tabel 1 serta memiliki pola belitan jangkar pada inti stator seperti ditunjukkan oleh Gambar 1 akan menghasilkan distribusi fluks yang tidak merata karena fluks yang dibangkitkan tidak melingkupi/melintasi seluruh bagian dari stator. Jumlah serta ukuran dari kutub-kutub magnet

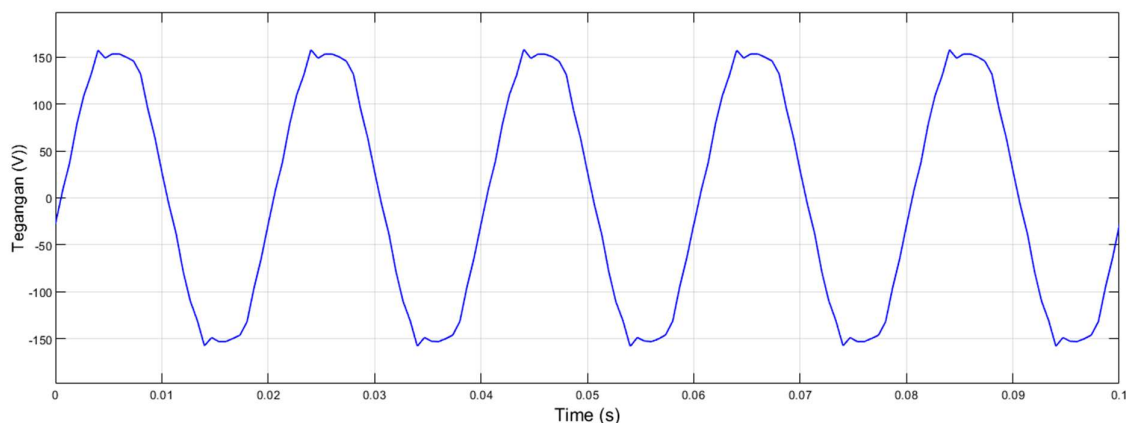
permanen kurang cocok jika diterapkan pada rancangan GMP ini (yang menggunakan ukuran stator dan rotor dari MI yang dimodifikasi). Jarak antar kutub magnet yang terlalu jauh menyebabkan banyak celah diantaranya yang berakibat pada tidak terlingkupinya seluruh inti stator oleh fluks. Distribusi fluks yang tidak merata ini akan berpengaruh terhadap profil ggl induksi/tegangan keluaran yang dihasilkan GMP.

Tabel 2 di bawah ini menampilkan beberapa data yang terkait dengan profil ggl induksi/tegangan keluaran rancangan GMP untuk kondisi operasi tanpa beban/beban nol.

Tabel 2. Profil Ggl Induksi/Tegangan Keluaran GMP Untuk Kondisi Tanpa Beban

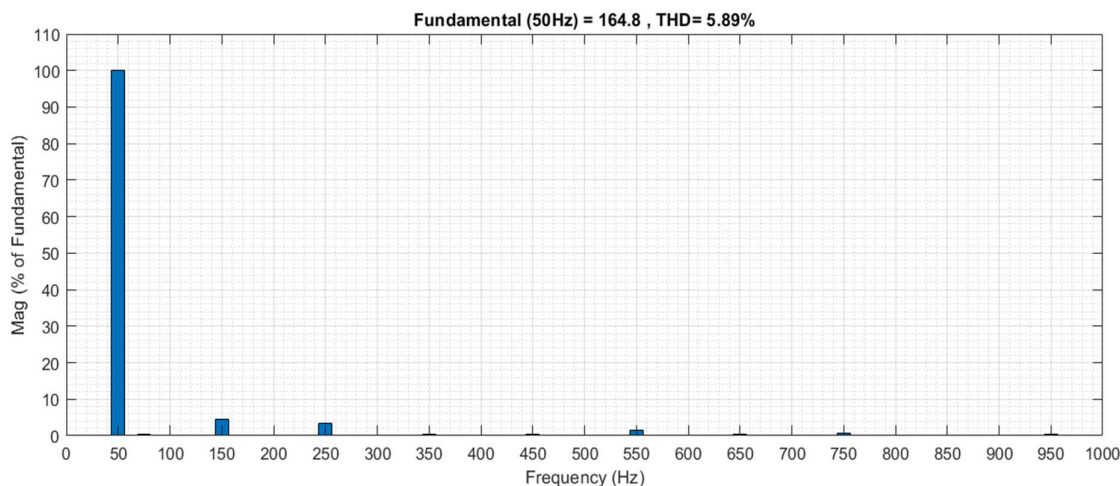
Kode rancangan	Putaran penggerak (rpm)	Frekuensi tegangan keluaran, f (Hz)	Nilai maksimum tegangan keluaran, V_{rms} (V)	Nilai efektif tegangan keluaran, V_{rms} (V)
36s8p	750	50	158,88	112,33

Berdasarkan data dalam Tabel 2 dapat diketahui bahwa hasil simulasi untuk rancangan GMP yang dioperasikan pada kondisi tanpa beban dengan putaran penggerak 750 rpm akan dapat menghasilkan ggl/tegangan keluaran maksimum sebesar 158,88 V. Nilai ini setara dengan nilai ggl induksi/tegangan keluaran efektif (rms) sebesar 112,33 V. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan nilai ggl induksi/tegangan keluaran efektif rancangan GMP yang diperoleh melalui perhitungan menggunakan Persamaan (3) – (6) serta data rancangan GMP dalam Tabel 1 yaitu sebesar 128,90 V. Lebih lanjut, simulasi yang dilakukan juga dapat menghasilkan bentuk gelombang dari ggl induksi/tegangan keluaran yang dibangkitkan rancangan GMP sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Bentuk Gelombang Ggl Induksi/Tegangan Keluaran Rancangan GMP

Gambar 6 menunjukkan bahwa berdasarkan hasil simulasi, rancangan GMP menghasilkan gelombang ggl induksi/tegangan keluaran ac satu-fasa non-sinusoidal. Terlihat bahwa bentuk gelombang ggl induksi/tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki cacat/distorsi pada bagian puncaknya, jika dibandingkan dengan bentuk gelombang sinusoidal murni. Gelombang ggl induksi/tegangan keluaran non-sinusoidal pada Gambar 6 di atas, memiliki spektrum harmonisa yang ditunjukkan oleh Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Spektrum Harmonisa Gelombang Ggl Induksi/Tegangan Keluaran Rancangan GMP

Terlihat bahwa tingkat distorsi/cacat gelombang ggl induksi/tegangan keluaran rancangan GMP ini adalah sebesar 5,89%, jika dibandingkan terhadap gelombang sinusoidal murni (gelombang sinusoidal tanpa distorsi/cacat). Adapun gelombang harmonisa dominan yang muncul adalah orde ke-3 pada nilai frekuensi 150 Hz atau tiga kali frekuensi fundamental 50 Hz, orde ke-5 pada nilai frekuensi 250 Hz atau lima kali frekuensi fundamental 50 Hz dan orde ke-11 pada nilai frekuensi 550 Hz atau sebelas kali frekuensi fundamental 50 Hz. Cacat pada gelombang ggl induksi/tegangan keluaran ini disebabkan oleh distribusi fluks pada inti stator yang tidak merata (sebagaimana penjelasan sebelumnya) yang diakibatkan oleh ukuran, jumlah serta pola pemasangan kutub-kutub magnet permanen yang kurang sesuai/cocok dengan konstruksi dari stator, belitan stator dan rotor MI yang dimodifikasi. GMP bekerja dengan memutar kutub-kutub magnet di sekitar belitan jangkar stator untuk menghasilkan ggl induksi/tegangan. Apabila fluks yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet tidak terdistribusi secara merata pada inti stator maka akan terdapat nilai fluks yang lebih tinggi yang dirasakan oleh belitan jangkar stator pada suatu area inti stator sementara nilai fluks yang lebih rendah akan dirasakan oleh belitan jangkar stator pada area inti stator lainnya. Kondisi kerapatan fluks yang tidak merata ini akan berpengaruh terhadap profil ggl induksi/tegangan keluaran yang dibangkitkan GMP.

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi terhadap rancangan GMP yang diperoleh melalui modifikasi MI menunjukkan distribusi fluks pada inti stator yang tidak merata. Beberapa bagian inti stator memiliki kerapatan fluks 1,2876 – 1,6095 T (tinggi), sementara beberapa bagian inti stator yang lain memiliki kerapatan fluks 0,6438 – 1,2876 T (sedang) dan 0 – 0,6438 T (rendah). Distribusi fluks yang tidak merata ini diakibatkan oleh penggunaan ukuran, jumlah serta pola pemasangan kutub-kutub magnet permanen yang kurang sesuai/cocok dengan konstruksi dari stator, belitan stator dan rotor MI yang dimodifikasi. Fluks yang dibangkitkan oleh kutub-kutub magnet permanen tidak dapat melingkupi seluruh inti stator. Lebih lanjut, rancangan GMP ini mampu membangkitkan ggl induksi/tegangan keluaran dengan nilai efektif sebesar 112,33 V, 50 Hz pada kondisi beban nol dan putaran penggerak 750 rpm. Adapun bentuk gelombang ggl induksi/tegangan keluaran yang dihasilkan adalah non-sinusoidal dengan nilai persentase THD sebesar 5,89% (memiliki tingkat distorsi/cacat gelombang sebesar 5,89% jika

dibandingkan terhadap bentuk gelombang sinusoidal murni), dimana komponen harmonisa dominan yang muncul adalah orde ke-3, ke-5 dan ke-11.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lentera Bumi Nusantara atas kesediaannya dalam membantu pelaksanaan penelitian ini dengan memberikan ijin penggunaan perangkat lunak simulasi Magnet Infolytica serta Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas bantuan dana penelitian yang diberikan.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahmed, D., Karim, F., & Ahmad, A. (2014). Design and modeling of low-speed axial flux permanent magnet generator for wind based micro-generation systems. *2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (ICREATE)*, (pp. 51–57).
- Amin, S., Madanzadeh, S., Khan, S., Bukhari, S. S. H., Akhtar, F., & Ro, J.-S. (2022). Effect of the magnet shape on the performance of coreless axial flux permanent magnet synchronous generator. *Electrical Engineering*, 1–10.
- Bell, J. (2023). Rare Earth Magnets: Manufacturing and Applications. *Rare Earth Metals and Minerals Industries: Status and Prospects*, 295–317.
- Chavan, R. D., & Bapat, V. N. (2016). The study of different topologies of Axial Flux Permanent Magnet generator. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, (pp. 202–206).
- Chung, D.-W., & You, Y.-M. (2014). Design and performance analysis of coreless axial-flux permanent-magnet generator for small wind turbines. *Journal of Magnetism*, *19*(3), 273–281.
- Di Dio, V., Cipriani, G., & Manno, D. (2022). Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generators for Pico Hydropower Application: A Parametrical Study. *Energies*, *15*(19), 6893.
- Eldoromi, M., Tohidi, S., Feyzi, M. R., Rostami, N., & Emadifar, R. (2018). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *26*(6), 3084–3099.
- Fikri, M. N., Buana, U. C., & Santoso, D. B. (2022). Desain Permanent Magnet Synchronous Generator Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Daya 500 Watt Dengan Kecepatan Angin Rendah. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, *8*(2), 200–212.
- Handika, Y. (2023). Pembuatan Generator Magnet Permanen 12 Kutup Menggunakan Motor

- Induksi. *CYCLOTRON*, 6(2).
- Hatzigryiou, G. (2014). Design aspects of coreless axial flux permanent magnet generators for low cost small wind turbine applications. *Scientific Proceedings of the EWEA Annual Conference and Exhibition, Barcelona*.
- Hlaing, T. T. (2018). Design and Construction of Low Speed Axial Flux Generator with Stationary Bike. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8(9).
- Irfan, M., Ermanu, A. H., Suhardi, D., Kasan, N., Effendy, M., Pakaya, I., & Faruq, A. (2018). A design of electrical permanent magnet generator for rural area wind power plant. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 9(1), 269.
- Kastawan, I. M. W., Erwin, Y., Rusmana, R., & Krisna, K. (2022). Field Experimental Study on Electrical Power Generation Using AC Single-Phase Permanent Magnet Generator. *5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*, (pp. 162–167).
- Kastawan, I. M. W., Yusuf, E., NKS, M. A. D., & Setiadi, H. (2021). Modification of the Single-Phase AC Induction Motor to the Low-Speed Single-Phase AC Permanent Magnet Generator. *2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021)*, (pp. 513–520).
- Lumbantoruan, D. (2022). *Analisa Dan Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator 12 Slot 8 Pole Dengan Menggunakan Fem*. Universitas Medan Area.
- Nugroho, S. (2016). *Desain Generator Magnet Permanen rpm Rendah Dengan Memanfaatkan Motor Kipas*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Prasetia, H. (2023). A Further Modification of Squirrel Cage Single-Phase Induction Motor to Low-Speed Single-Phase Permanent Magnet Generator to Generate Sinusoidal Output Voltage. *Proceedings of the 6th FIRST 2022 International Conference (FIRST 2022)*, 14, 191.
- Raja, H. C., & Kapo, H. Y. S. (2017). *Rancang Bangun Alat Pengatur Kecepatan Putaran Motor Induksi 1 Phasa 1 PK*. UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA.
- Saputra, R. (2014). Rancang Bangun Alat Pengatur Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Melalui Pengaturan Frekuensi Menggunakan Multivibrator Astable. *Universitas Bengkulu*.
- Setyawan, E. Y., Nakhoda, Y. I., Krismanto, A. U., Mustiadi, L., Yandri, E., & Burlakovs, J. (2020). Design and construction of single phase radial flux permanent magnet generators for pico hydro scale power plants using propeller turbines in water pipes. *E3S Web of Conferences*, 188, 6.
- Theraja, B. L. (2014). *A textbook of electrical technology*. S. Chand Publishing.
- Wirtayasa, K., Irasari, P., Kasim, M., Widiyanto, P., & Hikmawan, M. (2017). Design of an axial-

Simulasi Distribusi Fluks dan Tegangan Generator Magnet Permanen Satu-Fasa Hasil Modifikasi Motor
Induksi Rotor Sangkar Satu-Fasa

flux permanent-magnet generator (AFPMG) 1 kW, 220 volt, 300 rpm, 1 phase for pico hydro power plants. *2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, (pp. 172–179).