RANCANG BANGUN GENERATOR *MULTIDISC AXIAL FLUKS PERMANENT MAGNET* (AFPM) SATU-FASA DENGAN 3 STATOR DAN 2 ROTOR

Sidik Wiguna[1*)], I Made Wiwit Kastawan [2]

[1] Jurusan Teknik Elektro, [2] Jurusan Teknik Energi, Politeknik Negeri Bandung, 40559, Indonesia

[*)] *E-mail: sidikwiguna5@gmail.com*

Abstrak

Ketersediaan listrik di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, dan Tertinggal) masih terbatas akibat sulitnya akses ke jaringan listrik konvensional, meskipun daerah tersebut memiliki potensi energi terbarukan seperti angin dan air skala kecil. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membangun generator satu-fasa *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM) dengan konfigurasi 3 stator dan 2 rotor untuk memperoleh tegangan yang konstan dengan putaran yang rendah pada aplikasi portabel. Metode penelitian meliputi perancangan generator sistem *multidisc*, pemilihan bahan non-ferromagnetik, fabrikasi stator dan rotor, penggulungan 24 kumparan dengan 500 lilitan tiap kumparan, serta pemasangan magnet permanen NdFeB N52 sebanyak 12 kutub per sisi rotor. Pengujian dilakukan tanpa beban pada berbagai kecepatan putar untuk menganalisis tegangan dan bentuk gelombang keluaran. Hasil penelitian menunjukkan generator berhasil dibangun dengan dimensi kompak 15×15×15 cm yang memenuhi target portabilitas. Generator menghasilkan tegangan yang meningkat secara linier dari 17V (95 RPM) hingga 92,8V (535 RPM) dengan frekuensi 50-60Hz dan memiliki gelombang sinusoidal yang sangat baik. Generator dengan konfigurasi 3 stator-2 rotor dapat diaplikasikan untuk pembangkit portabel di kawasan 3T karena kemudahan pemasangan dan pemindahan serta kemampuan menghasilkan tegangan pada putaran rendah.

Kata kunci: Generator AFPM, Axial Flux Permanent Magnet, Putaran Rendah, Wilayah 3T, Energi Terbarukan

Abstract

The availability of electricity in remote, frontier, and disadvantaged regions (3T areas) remains limited due to difficult access to conventional power grids, although these areas have renewable energy potential such as wind and small-scale water resources. The purpose of this research is to design and build a single-phase Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) generator with 3 stator and 2 rotor configuration to obtain constant voltage at low rotational speeds for portable applications. The research methodology includes multidisc generator system design, non-ferromagnetic material selection, stator and rotor fabrication, winding of 24 coils with 500 turns per coil, and installation of NdFeB N52 permanent magnets with 12 poles per rotor side. Testing was conducted without load at various rotational speeds to analyze voltage and output waveform. The research results show that the generator was successfully built with compact dimensions of 15×15×15 cm meeting portability targets. The generator produces linearly increasing voltage from 17V (95 RPM) to 92.8V (535 RPM) with frequency of 50-60Hz and exhibits good sinusoidal waveforms.. The generator with 3 stator-2 rotor configuration can be applied for portable power generation in 3T areas due to ease of installation and relocation as well as the ability to generate voltage at low rotational speeds.

Keywords: AFPM Generator, Axial Flux Permanent Magnet, Low Speed, Remote Area, Renewable Energy

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan energi bersih semakin meningkat seiring upaya global menggantikan bahan bakar fosil dengan sumber energi hijau atau terbarukan [1]. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan wilayah yang luas dan beragam, menghadapi tantangan khusus dalam penyediaan energi listrik, terutama di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, dan Tertinggal). Wilayah-wilayah ini umumnya memiliki akses terbatas terhadap jaringan listrik nasional akibat hambatan geografis, ekonomi, dan teknis yang kompleks.

Ironisnya, wilayah 3T justru memiliki potensi energi terbarukan yang melimpah, khususnya energi angin dan

mikrohidro yang sangat cocok untuk pembangkit listrik skala kecil [2]. Namun, pemanfaatan potensi ini terhambat oleh keterbatasan teknologi pembangkit yang sesuai dengan karakteristik wilayah tersebut. Dibutuhkan solusi teknologi yang tidak hanya efisien dalam mengkonversi energi pada kecepatan rendah, tetapi juga portabel dan mudah dioperasikan oleh masyarakat setempat.

Generator *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM) merupakan jenis generator sinkron dengan arah fluks magnet sejajar sumbu putar [3]. Berbeda dengan generator radial konvensional, AFPM memiliki karakteristik unggul yang sangat sesuai untuk aplikasi energi terbarukan skala kecil: desain ringkas, efisiensi tinggi, dan mampu beroperasi pada kecepatan rendah tanpa memerlukan sistem pengganda putaran [4].

Keunggulan utama generator AFPM terletak pada desainnya yang tidak memerlukan eksitasi eksternal, sehingga efisiensinya meningkat karena kehilangan eksitasi dapat dieliminasi. Desain medan fluks aksial menghasilkan bobot ringan dan efisiensi tinggi karena penggunaan material inti yang minimal, serta memungkinkan rasio kerapatan torsi dan kepadatan daya yang sangat tinggi [5] [6]. Karakteristik ini menjadikan generator AFPM sangat cocok untuk aplikasi PLTB atau PLTMH di wilayah 3T.

Untuk meningkatkan performa dan kepadatan daya pada generator AFPM, konfigurasi *multidisc* telah dikembangkan sebagai solusi inovatif. Konfigurasi ini merupakan susunan berlapis antara rotor dan stator dalam satu sistem yang memungkinkan peningkatan tegangan dan daya keluaran tanpa perlu meningkatkan kecepatan putar secara signifikan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa generator AFPM dapat dikonfigurasi dalam berbagai bentuk, termasuk *double sided internal rotor* yang memiliki sebuah piringan rotor untuk menempatkan kutub-kutub magnet generator yang diapit oleh dua buah piringan stator [7]. Pengembangan lebih lanjut menunjukkan bahwa konfigurasi *multidisc* mampu menghasilkan daya hingga 580 W pada kecepatan rendah 263 rpm ketika diujikan pada turbin angin horizontal [8].

Aplikasi generator AFPM juga telah dikembangkan untuk pembangkit listrik DC dengan menggunakan rangkaian penyearah, dimana generator berfungsi sebagai sumber daya *input* rangkaian inverter yang mengubah DC menjadi AC [9]. Untuk aplikasi turbin angin, penelitian rancang bangun generator AFPM Neodymium dengan stator berbahan fiberglass menunjukkan kemampuan menghasilkan tegangan konstan dengan putaran rendah dalam bentuk stator dan rotor tunggal yang menunjukkan kesederhanaan konstruksi namun tetap efektif [10].

Inovasi dalam konfigurasi magnet juga telah dikembangkan, seperti generator AFPM tipe magnet statis dan dinamis internal stator yang dimodifikasi dengan menambah piringan magnet dan menempelkan kumparan pada magnet, sehingga magnet pasangannya dapat bergerak bebas di samping kumparan [11]. Hasil pengujian menunjukkan bahwa generator jenis ini dapat menghasilkan tegangan yang bervariasi dari 1,4 Volt pada putaran 30 rpm hingga 13,3 Volt pada putaran 300 rpm, dengan hubungan linear yang sangat baik [11].

Penggunaan magnet Neodymium (NdFeB) pada generator AFPM terbukti dapat meningkatkan fluks magnet dan tegangan keluaran hingga lebih dari 10 Volt pada kecepatan rendah [12] [13] [14]. Konfigurasi *multidisc* dengan kutub berlawanan (N-S) menggunakan magnet permanen NdFeB menunjukkan kemampuan menghasilkan tegangan relatif tinggi dengan putaran rendah [15].

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan pada generator AFPM, masih terdapat kesenjangan dalam pengembangan sistem yang secara khusus dirancang untuk aplikasi portabel di wilayah 3T. Sebagian besar penelitian sebelumnya fokus pada peningkatan daya dan efisiensi, namun belum banyak yang mengeksplorasi konfigurasi optimal untuk sistem portabel yang memerlukan dimensi kompak, kemudahan instalasi, dan kemampuan beroperasi pada kecepatan rendah.

Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, teridentifikasi bahwa generator AFPM memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai solusi pembangkit listrik portabel di wilayah 3T. Kemampuannya menghasilkan tegangan pada kecepatan rendah, konstruksi yang relatif sederhana, dan fleksibilitas konfigurasi menjadikannya pilihan yang tepat untuk aplikasi energi terbarukan skala kecil. Namun, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan konfigurasi generator, khususnya dalam hal penentuan jumlah stator dan rotor yang optimal, serta pengembangan sistem yang lebih kompak dan efisien untuk aplikasi portabel.

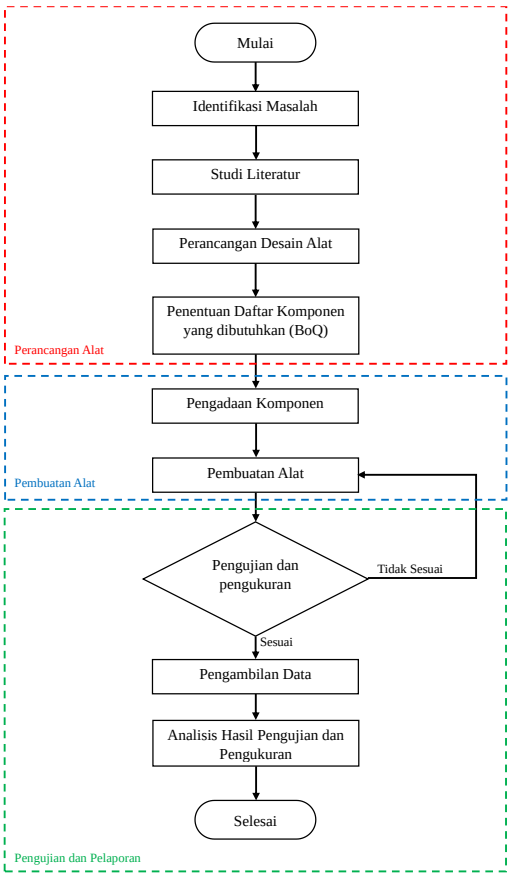
Penelitian ini mengusulkan konfigurasi 3 stator dan 2 rotor sebagai solusi inovatif untuk mencapai keseimbangan antara tegangan keluaran yang memadai, dimensi kompak, dan kemudahan operasi. Konfigurasi ini diharapkan dapat menghasilkan tegangan konstan pada putaran rendah sambil mempertahankan portabilitas sistem untuk aplikasi di wilayah 3T.

2. Metode

2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan desain, pembuatan alat, hingga pengujian dan

analisis hasil. Sebagai Gambaran dapat dilihat pada Gambar 1. Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi kebutuhan akan pembangkit listrik portabel untuk wilayah 3T yang memiliki karakteristik mudah dipindahkan dan dapat menghasilkan tegangan pada putaran rendah.



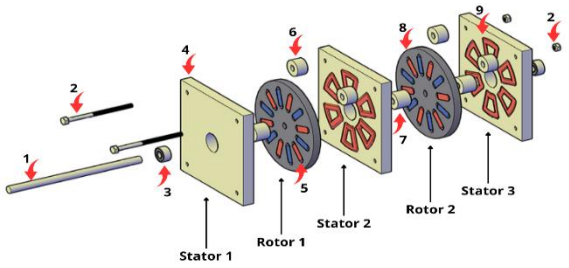
Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Perancangan Generator AFPM

Generator AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) *multidisc* dirancang dengan konfigurasi 3 stator dan 2 rotor (3S2R) yang disusun secara berlapis untuk meningkatkan densitas daya dalam dimensi yang kompak. Konfigurasi ini dipilih karena kemampuannya menghasilkan tegangan yang memadai pada putaran rendah, yang sangat sesuai untuk aplikasi portabel di wilayah terpencil.

Dalam konfigurasi 3S2R, susunan komponen dimulai dari stator pertama, diikuti rotor pertama, kemudian stator kedua, rotor kedua, dan terakhir stator ketiga. Dari ketiga stator tersebut, stator pertama dan ketiga memiliki belitan pada satu sisi saja (*single side*), sedangkan stator kedua memiliki belitan pada kedua sisinya (*double side*). Demikian pula dengan rotor, kedua rotor yang digunakan memiliki magnet permanen yang dipasang pada kedua sisinya (*double side*) untuk dapat berinteraksi dengan stator yang berada di kedua sisinya. Dengan demikian, terdapat empat sisi stator aktif yang dapat menghasilkan tegangan induksi ketika medan magnet dari rotor yang berputar melintasi kumparan-kumparan stator.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai konstruksi generator AFPM yang dirancang, ilustrasi susunan komponen dalam konfigurasi 3S2R ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Konstruksi Generator AFPM 1 Fasa dengan 3 Stator dan 2 Rotor

Keterangan :

1. Poros
2. Mur dan Baut
3. Bearing
4. Stator
5. Magnet permanen
6. Sekat antar stator
7. Sekat antar rotor
8. Rotor
9. Kumparan

Spesifikasi dasar generator ditetapkan berdasarkan kebutuhan aplikasi portabel yang memerlukan sistem pembangkit dengan dimensi kompak dan kemampuan operasi pada putaran rendah. Generator dirancang sebagai sistem satu fasa dengan kecepatan operasi berkisar 500 RPM dan frekuensi keluaran 50-60 Hz.

Konfigurasi 3 stator dan 2 rotor (3S2R) yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk memaksimalkan interaksi medan magnet dan kumparan dalam ruang terbatas. Dengan dua rotor yang masing-masing memiliki magnet di kedua sisinya, dan tiga stator yang terdiri dari dua stator *single-side* dan satu stator *double-side*, konfigurasi ini menghasilkan empat sisi stator aktif. Sisi aktif pada stator tengah (Stator 2) menerima fluks magnet dari dua arah, sehingga menghasilkan tegangan lebih tinggi dibandingkan sisi luar (Stator 1 dan 3) yang hanya menerima fluks dari satu sisi. Desain ini memungkinkan peningkatan densitas daya tanpa memperbesar dimensi fisik generator, menjadikannya ideal untuk aplikasi portabel di wilayah 3T.

2.3 Perancangan Rotor

Rotor sebagai komponen penghasil medan magnet dirancang menggunakan material PVC dengan ketebalan 10 mm yang dipilih karena sifatnya yang ringan, kuat secara mekanis, dan tahan korosi. Jumlah kutub magnet yang diperlukan untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz pada kecepatan putar sekitar 500 RPM dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \frac{120 \times f}{n_s} \quad (1)$$

Dengan kecepatan putar 500 RPM, jumlah kutub magnet yang dibutuhkan pada rotor untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz adalah 12 kutub.

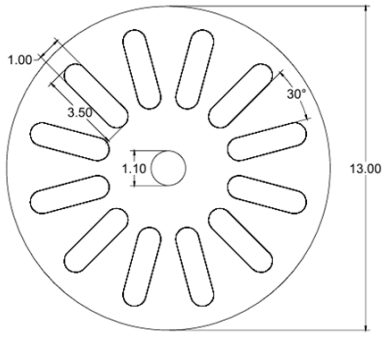
Magnet permanen yang digunakan adalah jenis NdFeB N52 dengan dimensi 30×10×5 mm yang dipasang dengan jarak sudut 30° antar magnet. Orientasi kutub magnet disusun secara bergantian (utara-selatan) untuk menghasilkan perubahan fluks magnet yang optimal.

Detail spesifikasi rotor yang telah dirancang disajikan dalam Tabel 1. untuk memberikan gambaran lengkap mengenai dimensi dan material yang digunakan.

Tabel 1 Spesifikasi Rotor

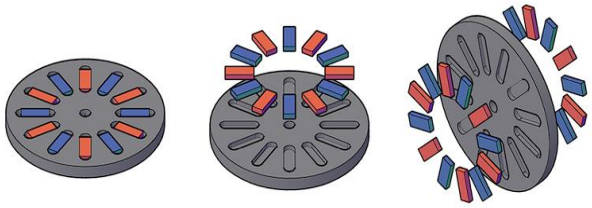
Parameter	Nilai
Diameter Rotor	13 cm
Tebal Rotor	10 mm
Jenis Magnet	NdFeB N52
Panjang Magnet	30 mm
Lebar Magnet	10 mm
Tebal Magnet	5 mm
Jarak Antar Magnet	30º
Jumlah Kutub per Rotor	12

Bentuk dan dimensi rotor yang telah dirancang pada Gambar 3



Gambar 3 Desain 2D Rotor

Teknik pemasangan magnet diperlihatkan pada Gambar 4. dengan menggunakan metode *embedded* dimana magnet di tanam pada rotor agar membuat permukaan rotor lebih rata dan efektif dalam mengarahkan medan magnet ke stator dan mengurangi kerugian fluks magnet yang tidak terkontrol.



Gambar 4. Pemasangan *Embedded* Magnet pada Desain 3D Rotor

2.4 Perancangan Stator

Stator dirancang menggunakan material akrilik dengan dimensi 15×15 cm dan ketebalan 1,5 cm. Pemilihan material akrilik didasarkan pada pertimbangan bobot ringan, ketahanan korosi, sifat isolatif yang baik, dan kemudahan fabrikasi. Stator dilengkapi dengan alur-alur untuk penempatan kumparan dengan lebar alur 1 cm dan jarak antar alur 30°.

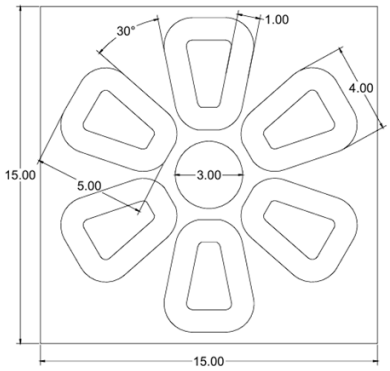
Berdasarkan pendekatan eksploratif dan pertimbangan teknis, digunakan kawat email berdiameter 0,20 mm yang menyesuaikan antara kapasitas arus yang dibutuhkan dan keterbatasan ruang pada slot stator. setiap sisi stator aktif dirancang memiliki 6 kumparan dengan masing-masing 500 lilitan. Dengan total 4 sisi aktif, generator memiliki 24 kumparan dengan total 12.000 lilitan.

Ringkasan lengkap spesifikasi stator yang telah dirancang disajikan dalam Tabel 2. untuk memberikan informasi detail mengenai parameter-parameter penting.

Tabel 2 Spesifikasi Stator

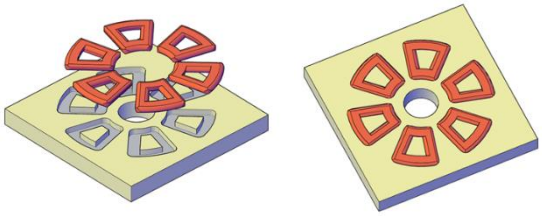
Parameter	Nilai
Dimensi stator	15x15 cm
Tebal stator	1,5 cm
Jumlah Kumparan per sisi stator	6 kumparan
Total Kumparan Stator	24 Kumparan
Jumlah Lilitan per Kumparan	500 lilitan
Diameter kawat email	0,20 mm
Lebar alur stator	1 cm
Jarak antar alur kumparan	30°
Diameter lubang stator	3 cm

Bentuk dan dimensi desain 2D stator yang telah dirancang ditunjukkan pada Gambar 5.



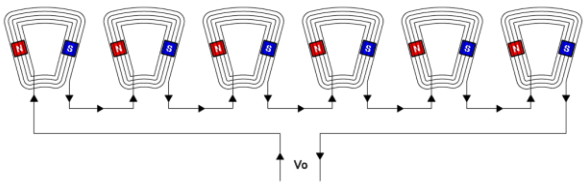
Gambar 5 Desain 2D Stator

Desain stator dalam bentuk 3D dan teknik pemasangan kumparan dapat dilihat pada Gambar 6 yang menampilkan struktur keseluruhan dan metode *slotted* stator.



Gambar 6 Pemasangan *Slotted Stator* pada Desain 3D Stator

Kumparan-kumparan ini dihubungkan secara seri untuk memaksimalkan tegangan keluaran. Untuk menunjukkan bagaimana kumparan-kumparan tersebut saling terhubung dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Pola Kumparan Pada Stator

2.5 Pembuatan dan Perakitan Generator

2.5.1 Pembuatan Rotor

Proses pembuatan rotor dimulai dengan pemotongan material PVC menjadi bentuk lingkaran dengan diameter 13 cm. Selanjutnya dilakukan penandaan untuk menandai posisi 12 alur magnet dengan jarak angular 30° untuk memastikan distribusi medan magnet yang merata seperti pada Gambar 8. Pembuatan alur magnet dilakukan menggunakan mesin bor dengan dimensi yang disesuaikan untuk magnet NdFeB N52 berukuran 30×10×5 mm. Proses *finishing* dilakukan dengan penghalusan permukaan dan *balancing* untuk menghindari getaran berlebih saat operasi. Gambar setelah magnet dipasang pada rotor dapat dilihat pada Gambar 9.

Gambar 8 Pembuatan Rotor

Gambar 9 Pemasangan Magnet

2.5.2 Pembuatan Stator

Proses pembuatan stator diawali dengan penandaan dan pengeboran alur selebar 1 cm dengan jarak sudut 30°, dilakukan secara presisi untuk memastikan pemasangan kumparan yang tepat seperti pada Gambar 10. Kumparan dililit menggunakan mesin khusus agar lilitan seragam seperti pada Gambar 11. lalu dipasang ke dalam alur dengan orientasi yang sesuai. Semua kumparan disusun secara seri untuk memaksimalkan tegangan keluaran seperti pada Gambar 12. Setelah pemasangan, stator diberi lapisan vernis sebagai pelindung terhadap kelembaban dan korosi. Terakhir, dilakukan pengujian kontinuitas guna memastikan tidak ada putus atau kerusakan pada sambungan kumparan.

Gambar 10 Pembuatan Stator

Gambar 11 Bentuk Kumparan

Gambar 12 Pemasangan Kumparan Pada Stator

2.6 Perakitan dan Penyelesaian

Perakitan generator dilakukan dengan menyusun seluruh komponen utama, yaitu 3 stator berisi kumparan, 2 rotor bermagnet permanen, poros utama, bearing, dan elemen mekanis pendukung lainnya seperti pada Gambar 13. Proses dimulai dari pemasangan bearing ke poros utama, lalu komponen dirakit secara berurutan mengikuti konfigurasi *multidisc*. Jarak celah udara antar rotor dan stator dijaga konstan sebesar 2,5 mm. Semua sambungan dikencangkan dengan mur dan baut secara merata. Setelah perakitan, dilakukan uji awal dengan memutar rotor secara manual untuk memastikan tidak ada gangguan mekanis dan mengecek kontinuitas listrik. Dimensi akhir generator adalah 15×15×15 cm, menjadikannya unit yang kompak dan siap diuji lebih lanjut. Gambar Generator AFPM setelah di rakit ditunjukan pada Gambar 14.

Gambar 13 Komponen-komponen Generator AFPM

Gambar 14 Generator AFPM Setelah Dirakit

3. Hasil dan Pembahasan

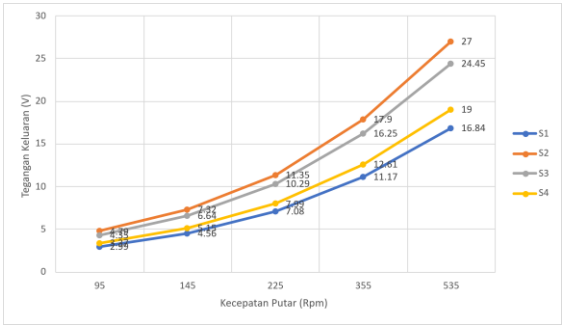
Pengujian generator dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik *output* dalam kondisi tanpa beban guna menganalisis kemampuan dasar generator menghasilkan tegangan listrik pada berbagai kecepatan putaran. Parameter yang diukur meliputi tegangan keluaran, frekuensi, dan bentuk gelombang yang ditampilkan pada osiloskop, dengan pengambilan data pada rentang kecepatan 95-535 RPM menggunakan bantuan sumber putaran dari mesin bubut. Keakuratan pengukuran dijaga dengan menggunakan instrumentasi yang terkalibrasi dan pengulangan pengukuran untuk memastikan konsistensi data yang diambil.

3.1 Pengujian Tegangan Keluaran

Hasil pengukuran tegangan keluaran pada masing masing sisi stator yang aktif dengan berbagai variasi kecepatan disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 15.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran per Sisi Stator Aktif

Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan Keluaran (V)			
	Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
95	2,99	4,79	4,35	3,37
145	4,56	7,32	6,64	5,15
225	7,08	11,35	10,29	7,99
355	11,17	17,90	16,25	12,61
535	16,84	27	24,45	19



Gambar 15 Grafik Tegangan Keluaran per Sisi Stator

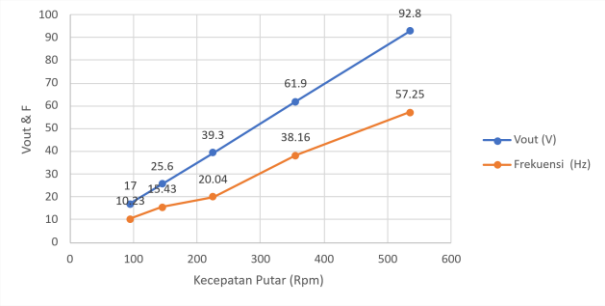
Dalam konfigurasi 3 stator dan 2 rotor ini, total terdapat 4 sisi stator aktif dimana 1 sisi dari Stator 1, 2 sisi dari Stator 2 yang berada ditengah, dan 1 sisi dari Stator 3, sehingga pengukuran dilakukan pada 4 titik yang berbeda ini.

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 3 dan pengamatan grafik pada Gambar 15, tegangan keluaran generator meningkat seiring bertambahnya kecepatan putar rotor (RPM), namun terdapat ketimpangan tegangan antar sisi stator aktif dimana sisi 2 dan sisi 3 menghasilkan tegangan lebih tinggi dibandingkan sisi 1 dan sisi 4 pada setiap tingkat kecepatan. Ketimpangan ini disebabkan oleh perbedaan posisi fisik dalam konfigurasi *multidisc* generator dengan susunan: Stator 1 (*single side*) – Rotor 1 (*double side*) – Stator 2 (*double side*) – Rotor 2 (*double side*) – Stator 3 (*single side*). Sisi stator aktif 2 dan 3 yang berada pada Stator 2 (bagian tengah) menerima fluks magnetik dari kedua rotor yang mengapitnya sehingga menghasilkan medan magnet yang lebih besar dan tegangan induksi yang lebih tinggi, sedangkan sisi stator aktif 1 dan 4 yang berada pada Stator 1 dan Stator 3 (bagian luar) hanya menerima fluks magnetik dari satu sisi rotor sehingga menghasilkan tegangan yang lebih rendah.

Hasil pengukuran tegangan keluaran pada berbagai kecepatan setelah semua stator diserikan disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 16.

Tabel 4 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran

No	Kecepatan (RPM)	Frekuensi (Hz)	Vout (V)
1	95	10,23	17
2	145	15,43	25,6
3	225	20,04	39,3
4	355	38,16	61,9
5	535	57,25	92,8

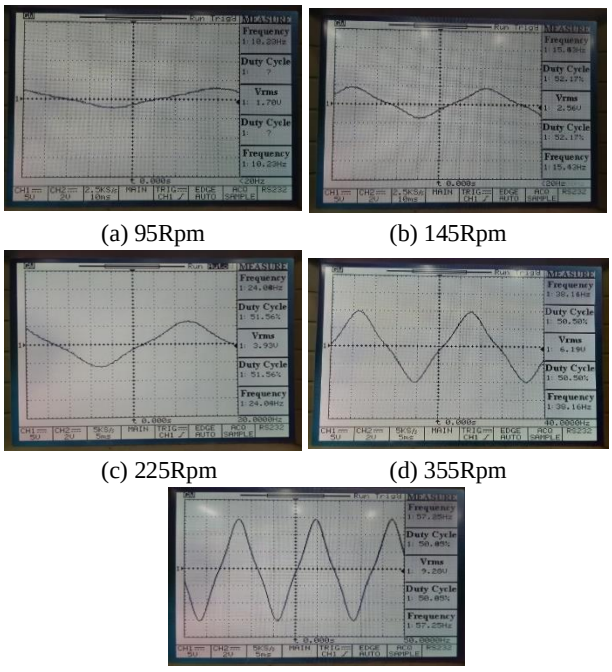


Gambar 16 Grafik Hubungan Kecepatan Putaran terhadap Tegangan Keluaran & Frekuensi

Berdasarkan data pada Tabel dan grafik pada Gambar 16, terlihat hubungan linier antara kecepatan putar (RPM) dengan tegangan keluaran dan frekuensi yang dihasilkan. Pada kecepatan rendah 95 RPM, generator mampu menghasilkan tegangan 17 V, menunjukkan bahwa sistem magnet dan kumparan telah mampu membangkitkan gaya gerak listrik (GGL) meskipun dalam kondisi putaran lambat. Seiring bertambahnya kecepatan putaran, tegangan keluaran meningkat dari 25,6 V pada 145 RPM (frekuensi 15,43 Hz) hingga mencapai 92,8 V pada 535 RPM (frekuensi 57,25 Hz), menunjukkan bahwa gaya gerak listrik yang dihasilkan sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik terhadap waktu sesuai hukum Faraday. Kinerja generator menunjukkan karakteristik linier, menandakan tidak terdapat gangguan signifikan seperti saturasi inti atau kehilangan fluks pada rentang pengujian ini.

3.2 Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran

Bentuk gelombang hasil pengujian diamati menggunakan osiloskop digital. Tujuan pengamatan ini adalah untuk memastikan bahwa tegangan keluaran mendekati bentuk sinusoidal, yang merupakan ciri khas sistem pembangkitan AC yang stabil dan minim distorsi. Hasil pengujian bentuk gelombang menggunakan osiloskop digital dapat dilihat pada Gambar 17.



(a) 95Rpm (b) 145Rpm

(c) 225Rpm (d) 355Rpm

(e) 535Rpm

Gambar 17 Bentuk Gelombang Keluaran (a) 95Rpm (b) 145Rpm (c) 225Rpm (d) 355Rpm (e) 535Rpm

Berdasarkan hasil pengujian bentuk gelombang keluaran generator pada berbagai kecepatan putaran yang ditampilkan pada Gambar 17, terlihat perubahan bertahap kualitas sinyal yang menunjukkan karakteristik pembangkitan tegangan AC yang konsisten dengan prinsip induksi elektromagnetik. Pada kecepatan 95 RPM Gambar 17(a), generator menghasilkan bentuk gelombang dengan amplitudo rendah namun sudah menunjukkan pola periodik yang teratur, mengindikasikan bahwa sistem magnet dan kumparan telah mampu menghasilkan gaya gerak listrik meskipun dalam kondisi putaran lambat. Seiring peningkatan kecepatan ke 145 RPM pada Gambar 17(b) dan 225 RPM pada Gambar 17(c), bentuk gelombang menunjukkan perbaikan signifikan dengan amplitudo yang semakin meningkat dan pola sinusoidal yang mulai terdefinisi dengan jelas, menunjukkan bahwa fluks magnetik yang melintasi kumparan semakin optimal. Pada kecepatan 335 RPM pada Gambar 17(d) dan 535 RPM pada Gambar 17(e), generator menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal yang sangat baik dengan karakteristik amplitudo tinggi, simetris terhadap sumbu horizontal, dan tidak menunjukkan distorsi harmonik yang signifikan. Bentuk gelombang pada kecepatan tinggi ini dapat dikatakan berkualitas baik karena mendekati bentuk sinus murni dengan puncak dan lembah yang terbentuk sempurna, menunjukkan bahwa tidak terdapat saturasi inti atau gangguan elektromagnetik yang mengganggu proses induksi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan membangun generator satu-fasa *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM) dengan konfigurasi 3 stator dan 2 rotor yang memenuhi tujuan untuk menghasilkan tegangan konstan pada putaran rendah dengan dimensi portabel. Generator yang dibangun memiliki dimensi kompak 15×15×15 cm dengan menggunakan magnet permanen NdFeB N52 dan 24 kumparan dengan total 12.000 lilitan, mampu menghasilkan tegangan keluaran yang meningkat secara linier dari 17V pada 95 RPM hingga 92,8V pada 535 RPM dengan frekuensi 50-60Hz dan bentuk gelombang sinusoidal yang sangat baik tanpa distorsi harmonik yang signifikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi *multidisc* dengan 3 stator dan 2 rotor efektif meningkatkan densitas daya dalam ruang yang terbatas, dimana stator bagian tengah sisi 2 dan sisi 3 yang berstruktur *double-side* menghasilkan tegangan lebih tinggi dibandingkan stator bagian luar sisi 1 dan sisi 4 yang berstruktur *single-side*, namun secara keseluruhan sistem mampu digunakan di wilayah 3T yang membutuhkan solusi pembangkitan listrik yang efisien, ringan, dan mudah dipindahkan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan pendanaan penelitian yang telah diberikan untuk pelaksanaan penelitian ini berdasarkan surat nomor 317/PL1/HK.02/2025.

Referensi

[1] M. Vatani, A. Mohammadi, D. Lewis, J. F. Eastham, dan D. M. Ionel, "Coreless Axial Flux Halbach Array Permanent Magnet Generator Concept for Direct-Drive Wind Turbine," *2023 IEEE Int. Conf. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2023.

[2] A. I. Yulianto and A. B. Yusuf, "Prospek Pendanaan Proyek Energi Terbarukan di Daerah 3T dengan Skema Digital Crowdfunding," *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 5 No. 4, pp. 586 - 591, 2023.

[3] H. Wang, X. Zeng, J. F. Eastham, and X. Pei, "Axial Flux Permanent Magnet Motor Topologies Magnetic Performance Comparison," *energies*, vol. 17, 2024.

[4] A. N. Widiyanto, R. Ariwidayat, F. Husnayan, A. Rahardjo, A. R. Utomo, dan I. M. Ardita, "Designing Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Generator with Double Rotor," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer (Elkha)*, vol. 14 No. 1, pp. 46 - 51, 2022.

[5] G. D. Todorov, K. H. Kamberov, and B. N. Zlatev, "Research and Development of a Large-Scale Axial-Flux Generator for Hydrokinetic Power System," *Applied Sciences*, vol. 14, 2024.

[6] Z. Hao, Y. Ma, P. Wang, G. Luo, and Y. Chen, " A ReviewofAxial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques," *Machines*, vol. 10, 2022.

[7] I. M. W. Kastawan and Rusmana, "PENGUJIAN PEMBANGKITAN TEGANGAN GENERATOR AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM) TIGA-FASA GANDA," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 16 No. 2, 2016.

[8] M. Yuhendri, M. Mushkir, and A. Taali, "Implementation of Three Phase Axial Flux Disc Permanent Magnet Generator for Low-Speed Horizontal Axis Wind Turbine," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 11 No. 4, pp. 1388 - 1394, 2021.

[9] B. S. Hartono, I. M. W. Kastawan, and A. B. Muhadi, "RANCANG BANGUN DC GENERATOR MAGNET PERMANEN TIPE AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM) MENGGUNAKAN RANGKAIAN PENYEARAH," *JURNAL TEKNIK ENERGI*, vol. 6 No. 1, 2016.

[10] A. N. Firdaus, A. Kusdinar, A. F. Fauzhan, and Y. A. Wibowo, "Rancang Bangun Generator Turbin Angin Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Neodymium dengan Stator berbahan Fiberglass," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 3 No. 6, pp. 684 - 693, 2024.

[11] A. Apridalianti Melkias and Rusmana, "RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM) TIPE MAGNET STATIS DAN DINAMIS INTERNAL STATOR," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 9 No. 1, 2019.

[12] H. Prasetijo, "Pengaruh Inti Stator Terhadap Performa Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa," *Jurnal Riset Sains dan Teknologi*, vol. 6 No. 2, pp. 165 - 169, 2022.

[13] S. Syam, S. Kurniati, dan F. A. K. Yuliana, "RANCANG BANGUN GENERATOR

AKSIAL DENGAN MENGGUNAKAN MAGNET PERMANEN NdFeB PERSEGI PANJANG," *Jurnal Media Elektro,* vol. X No. 2, 2021.

[14] M. K. A. Rosa, Jorinaldi, and H. F. Sianipar, "RANCANG BANGUN GENERATOR FLUKS AKSIAL MAGNET PERMANEN SATU FASA 12 KUTUB DENGAN STATOR GANDA," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan),* vol. 11 No. 3, pp. 869 - 876, 2023.

[15] P. P. Pratama, W. Hadik, and W. Cahyadi, "RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM) MULTICAKRAM 1 FASA DENGAN KUTUB BERLAWANAN (N-S) MENGGUNAKAN MAGNET PERMANEN NEODYMIUM IRON BORON (NdFeB)," *TRANSMISI: JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO,* vol. 23 No. 2, pp. 58 - 67, 2021.