

Maximum power point tracking pada generator magnet permanen menggunakan fuzzy logic control

Ismiyah Rahmawati Hidayah^{1*}, Sofian Yahya², Adnan Rafi Al Tahtawi³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung 40559, Indonesia

^{1*}ismiyah.rahmawati.toi18@polban.ac.id, ²sofianyahya@polban.ac.id, ³adnan.rafi@polban.ac.id

ABSTRAK

Generator merupakan salah satu jenis mesin listrik yang banyak digunakan pada sistem pembangkit tenaga listrik. Namun, seringkali generator memiliki efisiensi daya yang rendah akibat kondisi pembebanan maupun gangguan. Untuk mengoptimalkan daya generator, terdapat berbagai cara salah satunya dengan *maximum power point tracking* (MPPT). Pada penelitian ini, MPPT digunakan untuk memaksimalkan daya keluaran pada generator magnet permanen (PMSG). Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat alat optimalisasi daya keluaran pada penyearah generator magnet permanen dengan kendali *fuzzy logic control* (FLC). Kendali FLC dirancang dengan masukan berupa *error* dan perubahannya. Setelah itu keluaran dari FLC akan berupa *duty cycle* yang akan menjadi masukan konverter DC-DC. Keluaran dari sistem ini berupa penambahan dan pengurangan *duty cycle* agar daya keluaran sama dengan daya masukan yang dapat dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Mega2560. Dari hasil pengujian, didapat bahwa MPPT telah berhasil menjejaki titik kerja keluaran dari penyearah sehingga mendapatkan daya keluaran hampir sama dengan daya masukan. Efisiensi yang didapat dari sistem dengan MPPT ini sebesar 94% jauh lebih baik daripada sistem tanpa MPPT sebesar 84%.

Kata kunci: PMSG, MPPT, *fuzzy logic control*, konverter DC-DC

ABSTRACT

Generator is one type of electric machine that is widely used in power generation systems. However, generators often have low power efficiency due to loading and disturbance conditions. To optimize generator power, there are various ways, one of which is *maximum power point tracking* (MPPT). In this study, MPPT is used to maximize the output power of the permanent magnet generator (PMSG). This study aims to design and manufacture a device for optimizing the output power of a permanent magnet generator rectifier with *fuzzy logic control* (FLC). FLC control is designed with input in the form of errors and their changes. After that the output from the FLC will be in the form of a *duty cycle* which will be the input to the DC-DC converter. The output of this system is the addition and reduction of the *duty cycle* so that the output power is the same as the input power which can be controlled by the Arduino Mega2560 microcontroller. From the test results, it was found that the MPPT had succeeded in tracking the working point of the output of the rectifier so that the output power was almost the same as the input power. The efficiency obtained from the system with this MPPT is 94%, much better than the system without MPPT, which is 84%.

Keywords: PMSG, MPPT, *fuzzy logic control*, DC-DC converter

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang kaya akan energi. Belakangan ini energi tak terbarukan semakin menipis. Dengan adanya kondisi tersebut menyebabkan perlunya alternatif untuk menggantikan sumber energi tak terbarukan, yaitu berupa energi baru dan terbarukan (*renewable energy*). Salah satu energi terbarukan yang dimiliki Indonesia adalah energi air. Berdasarkan kondisi penyediaan infrastruktur tenaga listrik nasional, Indonesia tercatat memiliki energi berkapasitas 72.888 Megawatt yang didominasi 86,45% adalah energi fosil. Dilihat dari sisi bauran EBT yang hanya 13,55% tersebut, pembangkit listrik tenaga air mempunyai cakupan paling besar mencapai 6.144 megawatt, panas bumi 2.131 Megawatt, dan energi bersih lainnya sebanyak 2.215 Megawatt [1].

Pemanfaatan energi air sendiri yaitu dapat dijadikan berupa turbin air yang berfungsi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis. Putaran dari turbin akan diteruskan oleh generator yang nantinya akan mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Dalam hal ini generator menjadi komponen yang cukup krusial kegunaannya. Generator memiliki banyak jenis, salah satunya *permanent magnet synchronous generator* (PMSG). Kelebihan dari PMSG sendiri biasanya untuk membangkitkan listrik dengan daya yang rendah, sehingga penggunaan PMSG sangat cocok digunakan sebagai pembangkitan listrik tenaga air untuk skala kecil. Kelebihan yang lainnya yaitu pada generator magnet permanen dapat mengurangi polusi yang ditimbulkan karena generator ini tidak berisik, dan tanpa gas sisa pembakaran. Keluaran tegangan dan daya generator yang bersumber dari turbin air pasti berubah-ubah sesuai kecepatan air, oleh karena itu untuk mengoptimalkan energi tersebut terdapat berbagai cara salah satunya dengan *maximum power point tracking* (MPPT).

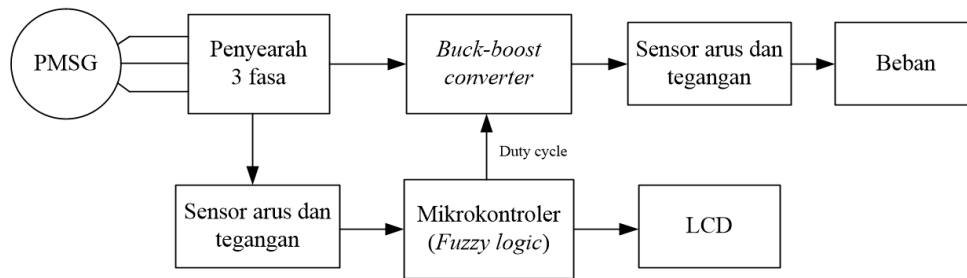
Berbagai macam penelitian mengenai kendali MPPT sudah banyak dilakukan oleh peneliti dengan tujuan untuk mendapatkan metode yang terbaik agar dapat memperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Peneliti [2] merancang sistem MPPT pada panel surya menggunakan metode *tracking online* dengan motor servo dan pengendali. Hasilnya, sistem tersebut dapat melakukan *tracking* berkelanjutan untuk mencari tegangan *maximum open circuit*. Selain itu, tidak jauh beda dengan penelitian mengenai perancangan sistem MPPT pada *solar cell*, metode *sliding mode control* (SMC) dirancang oleh [3] yang digunakan untuk mencari titik daya maksimum. Metode SMC dapat melacak kecepatan kerja yang bersifat sangat *robust* juga memiliki ketahanan kuat terhadap gangguan yang ada. SMC memiliki pendekatan yang sistematis untuk mengarahkan masalah kestabilan. Konverter DC-DC memiliki tiga jenis rangkaian diantaranya *buck*, *boost*, dan *buck-boost* dimana semua ini dapat digunakan dalam sistem MPPT untuk menstabilkan tegangan. Pada penelitian yang dilakukan oleh [4] dalam pembuatan prototipe MPPT dengan *buck-boost converter* menggunakan metode pengendali PID menghasilkan daya maksimal pada setiap kondisi cahaya matahari. Selanjutnya penelitian yang hampir sama yaitu dilakukan oleh [5] dan [6] yang melakukan penelitian mengenai kontrol MPPT untuk mencari titik daya maksimum dengan *buck-boost converter* menggunakan metode *perturb & observe* (P&O). Hasil dari penelitian ini memiliki gangguan (*perturb*) untuk mengetahui titik tertinggi sehingga tegangan yang diperoleh beresilasi. Oleh karena itu, metode P&O ini belum dapat dikatakan sangat efektif untuk digunakan. Selanjutnya, penelitian yang hampir sama dilakukan oleh [7] dan [8] dengan objek yang berbeda yaitu pada PMSG. Pada penelitian ini dirancang simulasi MPPT dengan membandingkan dua metode yaitu P&O dan *fuzzy logic controller* (FLC). Hasil dari perbandingan ini metode P&O memiliki *ripple* yang cukup besar. FLC dapat digunakan untuk memperkuat perilaku dinamis dari PMSG yang digerakkan oleh angin maupun air [9].

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan MPPT yang digunakan untuk memaksimalkan daya keluaran pada PMSG. Sebagai pendukung sistem MPPT, digunakan konverter DC-DC tipe *buck-boost* untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Keluaran dari penyearah berupa arus dan tegangan dideteksi sebagai masukan algoritma MPPT berupa tegangan dan daya. Kemudian dilakukan pensaklaran dengan MPPT yang nantinya untuk menghasilkan perubahan *duty cycle* yang kemudian dikonversi menjadi sinyal *pulse width modulation* (PWM). Penelitian ini menggunakan metode FLC sebagai algoritma MPPT. Metode ini dinilai cukup efektif dikarenakan memiliki respon yang cepat [10]. Dengan diterapkannya metode FLC maka daya keluaran yang dihasilkan PMSG akan diharapkan dapat tetap berada pada kondisi maksimum.

2. METODE PENELITIAN

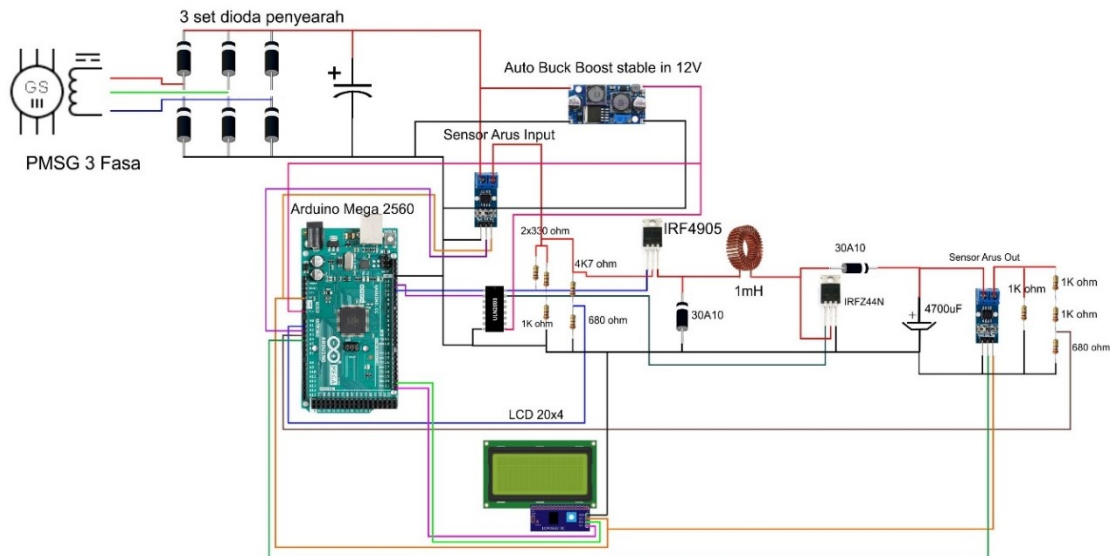
2.1 Perancangan Sistem

Penelitian ini mengusulkan sistem MPPT pada PMSG dengan diagram blok seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem yang dirancang terdiri dari PMSG yang mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Generator akan membangkitkan tegangan AC tiga fasa dari turbin air dan kemudian disearahkan oleh penyearah (*rectifier*). Penyearah berfungsi sebagai pengubah tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Keluaran dari penyearah berupa arus dan tegangan yang terbaca oleh sensor arus dan tegangan. Hasil dari pembacaan tersebut dideteksi sebagai masukan algoritma MPPT yang dijadikan sebagai penentuan besarnya *duty cycle* (D) untuk mengatur pensaklaran pada mosfet yang terdapat pada *buck-boost converter*.



Gambar 1. Diagram blok sistem sistem MPPT pada PMSG

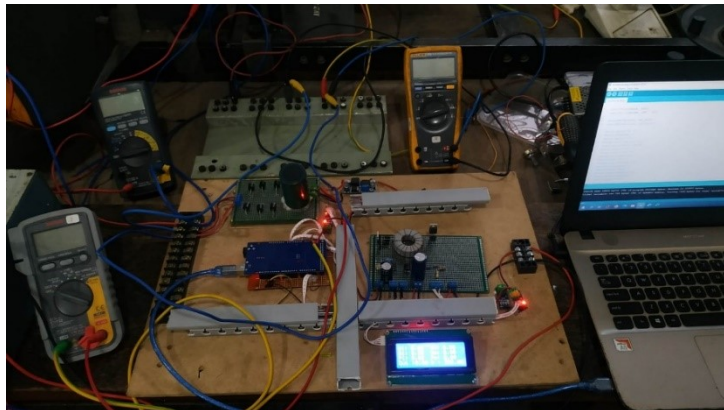
Algoritma MPPT yang digunakan yaitu FLC yang terdapat pada mikrokontroler Arduino Mega2560 yang bertugas untuk pelacakan titik daya maksimum pada penyearah generator magnet permanen. Pelacakan titik daya maksimum berfungsi untuk menghasilkan perubahan nilai *duty cycle* yang kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM yang nantinya akan dikirimkan pada *converter* agar menghasilkan titik daya maksimum pada PMSG. Jenis konverter yang digunakan berupa *buck-boost converter* yang berfungsi sebagai menaikkan (*step-up*) dan menurunkan (*step-down*) level tegangan yang dihasilkan oleh penyearah dan akan disesuaikan dengan keluaran yang sudah ditentukan.



Gambar 2. Rangkaian elektronik sistem MPPT

Gambar 2 menunjukkan perancangan dari rangkaian elektronik yang menggunakan sumber PMSG dengan keluaran tegangan AC 3-fasa dengan daya nominal 300 Watt dan tegangan keluaran sebesar 24 VAC. Kemudian keluaran dari generator akan disearahkan oleh penyearah 3-fasa yang menggunakan 6 buah dioda penyearah. Keluaran dari penyearah berupa arus dan tegangan yang terbaca oleh sensor arus dan tegangan. Hasil dari pembacaan tersebut dideteksi sebagai masukan algoritma MPPT yang dijadikan sebagai penentuan besarnya *duty cycle* (D) untuk mengatur penyaklaran pada mosfet yang terdapat pada *buck-boost converter*. Untuk pengendaliannya menggunakan mikrokontroler Arduino Mega2560 yang menghasilkan PWM dan dapat mengatur switch mosfet pada *buck-boost converter*. Ada dua mosfet yang digunakan pada *buck-boost converter* dengan jenis yang berbeda yaitu IRF4905 (tipe P) untuk mode *buck* dan IRFZ44N (tipe N) untuk mode *boost*. Sensor tegangan dan sensor arus ACS712 akan mengirimkan sinyal ke mikrokontroler untuk mengubah nilai *duty cycle* PWM secara otomatis dan sekaligus menunjukkan arus dan tegangan keluaran dari penyearah generator dan *buck-boost converter*.

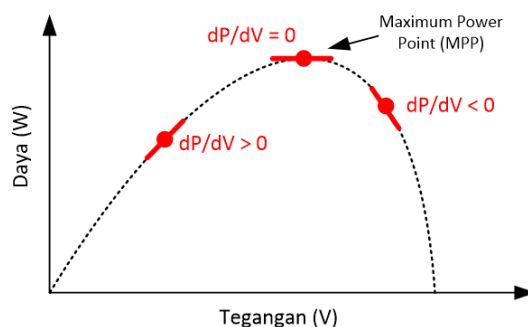
Gambar 3 menunjukkan realisasi rangkaian keseluruhan yang terdiri dari rangkaian penyearah, rangkaian *buck-boost converter*, sensor arus dan tegangan, Arduino Mega2560, dan LCD. Kemudian tegangan dan arus keluaran akan terukur juga pada multimeter.



Gambar 3. Realisasi perangkat keras

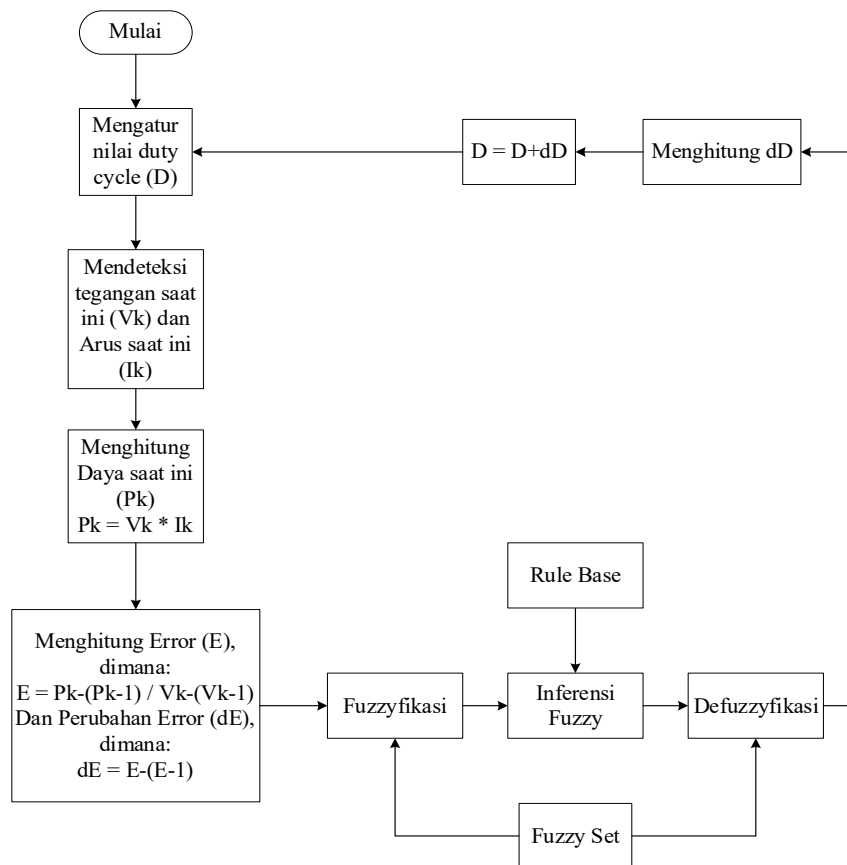
2.2 Perancangan Algoritma MPPT

Gambar 4 menunjukan kurva hubungan antara daya dan tegangan pada mekanisme MPPT. Berdasarkan kurva tersebut dapat dilihat bahwa daya maksimum dapat dihasilkan apabila tidak terdapat perubahan daya terhadap perubahan tegangan atau $dP/dV = 0$. Algoritma yang akan dirancang bertujuan untuk selalu membuat kondisi ini dapat dipenuhi. Apabila terdapat perubahan daya naik terhadap tegangan atau pada kondisi $dP/dV > 0$, maka algoritma MPPT akan memaksa agar kondisi ini segera mencapai kondisi $dP/dV = 0$. Sebaliknya, apabila terjadi perubahan daya turun terhadap tegangan atau $dP/dV < 0$, maka algoritma MPPT akan berupaya mengembalikan kondisi ini ke $dP/dV = 0$. Mekanisme ini akan bekerja terus menerus dan dengan demikian daya maksimum akan selalu dapat dicapai.



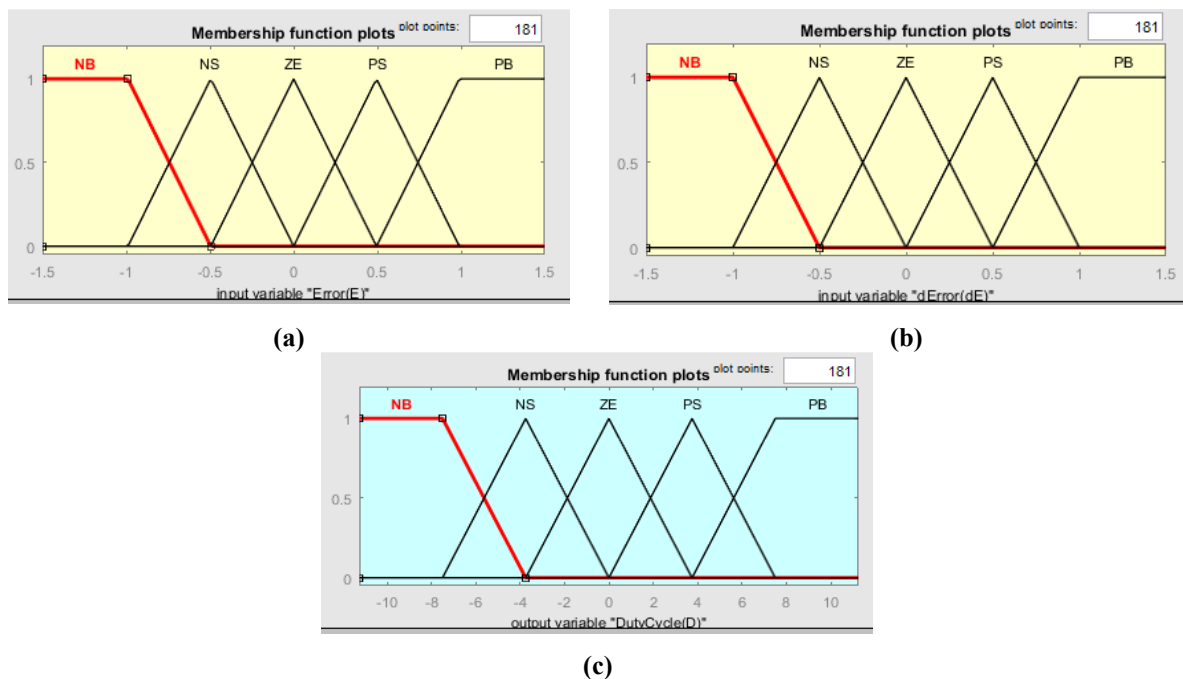
Gambar 4. Kurva hubungan P-V pada MPPT

Penelitian ini menggunakan algoritma FLC untuk menjaga agar daya selalu pada kondisi maksimumnya. Gambar 5 menunjukkan MPPT dimulai saat sistem mendeteksi daya masukan saat ini (P_k) dan tegangan masukan saat ini (V_k). Daya masukan saat ini (P_k) akan dibandingkan dengan daya masukan sebelumnya (P_{k-1}). Berdasarkan perbandingan tadi akan diperoleh perubahan daya (dP). Selanjutnya tegangan masukan saat ini (V_k) akan dibandingkan dengan tegangan masukan sebelumnya (V_{k-1}). Berdasarkan perbandingan tersebut akan diperoleh perubahan tegangan (dV). Kemudian hasil dari perubahan daya (dP) nantinya akan dibandingkan dengan perubahan tegangan (dV). Akibat perbandingan tersebut adalah nilai *error* yang terjadi pada saat ini (E). Kemudian *error* saat ini akan dibandingkan dengan *error* sebelumnya (dE). Hasil *error* saat ini (E) dan *error* sebelumnya (dE) dijadikan sebagai masukan ke dalam FLC. Lalu keluaran dari FLC berupa perubahan *duty cycle* (dD) yang akan menambah atau mengurangi *duty cycle* yang diberikan ke *buck-boost converter*.



Gambar 5. Diagram alir MPPT dengan algoritma FLC

Dalam perancangan FLC metode yang digunakan untuk menentukan *fuzzy rules* yaitu metode Mamdani. Dengan dua masukan yaitu *error* (E) dan perubahan *error* (dE), sedangkan keluarannya satu berupa *duty cycle* yang menjadi masukan untuk *buck-boost converter*. Adapun fungsi keanggotaan untuk masukan dan keluaran dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Fungsi keanggotaan FLC: (a) masukan *error* (E), (b) masukan perubahan *error* (dE), (c) keluaran *duty cycle*

Setiap fungsi keanggotaan memiliki lima variable linguistik yaitu NB (*negative big*), NS (*negative small*), ZE (*zero*), PS (*positive small*), dan PB (*positive big*). Untuk nilai *error* dan perubahannya dirancang pada rentang nilai -1,5 sampai dengan 1,5 sedangkan untuk keluaran *duty cycle* dirancang pada -10% sampai dengan +10%. Nilai negatif dan positif pada masukan menunjukkan apakah kondisi perubahan daya sedang mengalami kenaikan atau penurunan, sedangkan pada bagian keluaran tanda positif dan negatif pada *duty cycle* menunjukkan penambahan atau pengurangan dari *duty cycle* yang telah diberikan. Adapun basis aturan yang digunakan sebanyak 25 aturan *if-then* seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Basis aturan MPPT dengan FLC

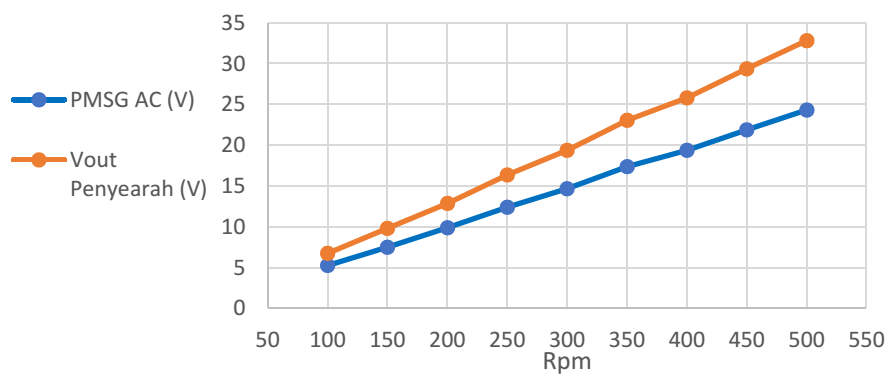
dE/E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Berdasarkan basis aturan tersebut, dapat dilihat bahwa pada kondisi E dan dE negatif (NB), maka tidak diberikan atau dikurangkan *duty cycle* pada konverter DC-DC. Hal ini karena nilai E negatif tidak akan menyebabkan daya menjadi turun dikarenakan dE-nya negatif atau perubahannya turun. Hal yang sama berlaku pada kondisi E dan dE positif (PB) dan zero (ZE). Algoritma FLC akan bekerja menambah *duty cycle* pada kondisi E negatif dan dE positif, sedangkan *duty cycle* akan dikurangi pada kondisi E positif dan dE negatif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Penyearah 3-Fasa

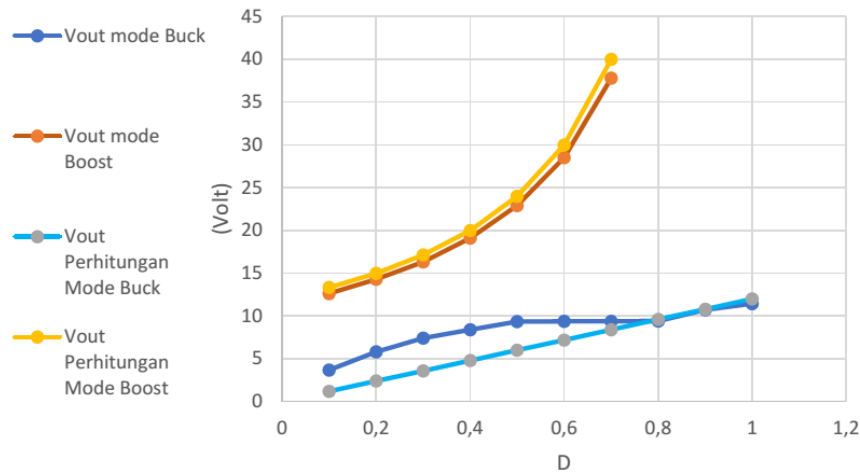
Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa hasil dari pengujian rangkaian penyearah 3-fasa tanpa beban dapat dilakukan dari nilai kecepatan 100 hingga 500 rpm. Dengan bertambahnya kecepatan, nilai tegangan keluaran generator semakin besar begitupun nilai tegangan keluaran penyearah juga semakin besar. Hal ini dapat dikatakan bahwa pengujian penyearah 3-fasa tanpa beban telah berhasil dilakukan dengan tegangan masukan generator 5-24 V.



Gambar 7. Grafik pengujian penyearah 3-fasa

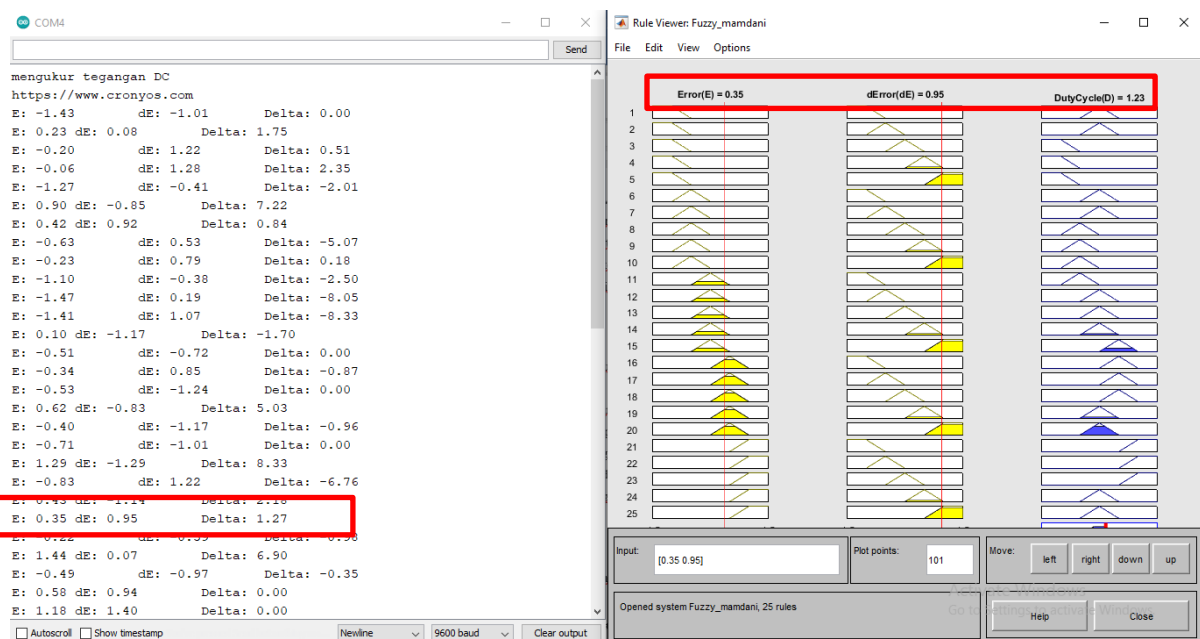
3.2 Hasil Pengujian Buck-Boost Converter

Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian konverter *buck-boost* dengan tegangan masukan konstan 12 V dan mengatur nilai *duty cycle* dari 10% hingga 100%. Hal ini dapat dikatakan bahwa semakin besar kenaikan *duty-cycle* maka tegangan keluaran juga akan semakin besar. Pengujian tersebut dapat dikatakan telah sesuai dengan yang diharapkan karena antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran, grafiknya relatif sama baik di mode *buck* maupun mode *boost*. Meskipun pengukuran dan perhitungan diketahui masih terdapat *error*, tetapi *error* ini masih terbilang kecil yaitu sebesar 0,65%.

Gambar 8. Grafik pengujian *buck-boost converter*

3.3 Pengujian FLC

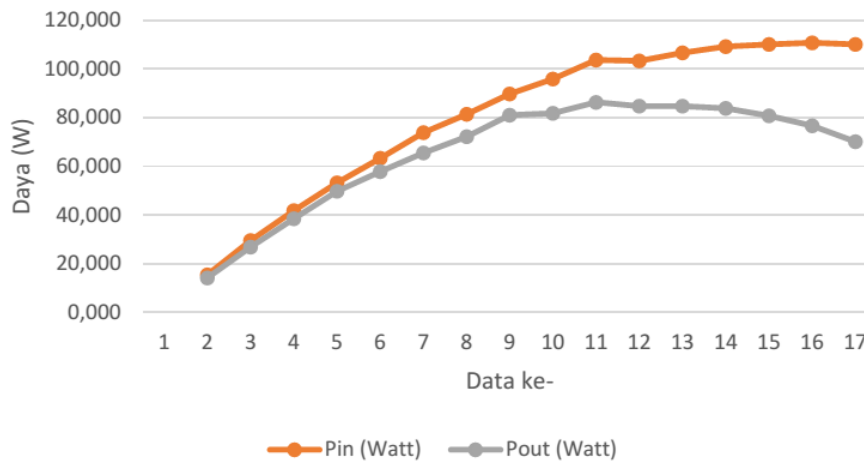
Pengujian FLC dilakukan untuk mengetahui apakah keluaran yang terdapat pada mikrokontroler sesuai dengan hasil yang telah dibuat pada simulasi MATLAB. Pengujian ini dilakukan dengan memasukkan nilai *error* dan *derror* secara manual pada program mikrokontroler secara acak begitupun nilai *error* dan *derror* pada MATLAB yang disesuaikan dengan mikrokontroler. Setelah itu dibandingkan apakah nilai keluaran pada mikrokontroler sesuai dengan nilai keluaran FLC pada MATLAB. Gambar 9 merupakan hasil pengujian algoritma FLC pada mikrokontroler dan MATLAB



Gambar 9. Pengujian algoritma FLC pada mikrokontroler (kiri) dan MATLAB (kanan)

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa algoritma FLC telah bekerja sesuai perancangan. Hal ini dapat dilihat pada pengujian dengan memasukan nilai *error* 0,35 dan *derror* 0,95 kemudian keluarannya sebesar 1,27% pada mikrokontroler. Jika dibandingkan pada MATLAB, hasilnya keluaran perubahan *duty cycle* sebesar 1,23%. Dengan demikian keluaran *duty cycle* pada mikrokontroler dengan simulasi MATLAB hampir sama hanya dengan selisih 0,04%.

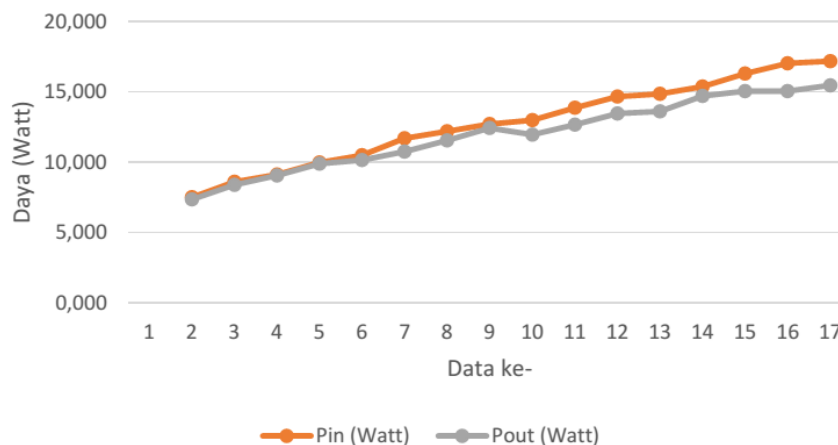
3.4 Pengujian Sistem Tanpa MPPT



Gambar 10. Pengujian sistem tanpa MPPT

Gambar 10 merupakan pengujian sistem tanpa MPPT. Pengujian ini dilakukan dengan mengatur nilai kecepatan konstan sebesar 500 rpm untuk setiap uji cobanya. Pengujian dilakukan dengan mengatur arus beban mulai dari 0,5 A hingga 8 A. Dapat dilihat pada grafik bahwa daya keluaran yang dihasilkan mendekati dengan daya masukan. Rata-rata *error* yang didapat dari pengujian tanpa MPPT yaitu sebesar 0,162% dan efisiensi rata-rata yang didapat sebesar 84%.

3.5 Hasil Pengujian Sistem dengan MPPT



Gambar 11. Pengujian sistem dengan MPPT

Gambar 11 merupakan pengujian sistem dengan MPPT menggunakan FLC. Pengujian ini dilakukan dengan mengatur nilai kecepatan konstan sebesar 200 rpm untuk setiap uji cobanya. Pengujian dilakukan dengan mengatur arus beban mulai dari 0,7 A hingga mencapai 2,24 A dengan perbedaan *range* 0,1 A. Dapat dilihat pada grafik bahwa daya keluaran yang dihasilkan sangat mendekati dengan daya masukan. Rata-rata *error* yang didapat dari pengujian sistem dengan MPPT yaitu sebesar 0,057% dan efisiensi rata-rata yang didapat sebesar 94%. Hal ini dapat dikatakan bahwa MPPT dengan FLC telah berhasil menjejaki titik daya maksimumnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem MPPT pada generator magnet permanen menggunakan metode FLC berbasis mikrokontroler. Dari pengujian kinerja sistem diketahui MPPT dapat memaksimalkan daya keluaran dimana daya keluaran yang dihasilkan sesuai dengan daya masukan. Dengan menggunakan MPPT, daya keluaran sistem yang dihasilkan hampir mendekati daya masukannya walaupun masih terdapat *error* sebesar 0,057%. Akan tetapi efisiensi dari pengujian sistem dengan MPPT jauh lebih baik dibandingkan tanpa MPPT yaitu sebesar 94%. Hal ini dapat dikatakan bahwa sistem dengan MPPT menggunakan FLC telah berhasil diterapkan pada generator magnet permanen. Pada penelitian selanjutnya dapat diterapkan algoritma MPPT lainnya agar dihasilkan efisiensi daya yang lebih baik.

REFERENSI

- [1] K. Setiawan, "Realisasi Bauran Energi Baru Terbarukan Capai 13,55 Persen, Naik 2,04 Persen," *Tempo*, Jun. 04, 2021. <https://bisnis.tempo.co/read/1468914/realisasi-bauran-energi-baru-terbarukan-capai-1355-persen-naik-204-persen> (accessed Feb. 04, 2022).
- [2] T. Nurhayati, "Desain dan Implementasi Maximum Power Solar Tracker Menggunakan Panel Photovoltaic Di Kota Semarang," *eLEKTRIKAL*, vol. 10, no. 1, pp. 5-9, 2018.
- [3] A. Faizal and B. Setyaji, "Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya Menggunakan Metode Sliding Mode Control," *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 10, 2016.
- [4] N. Arianto, M. Hasan Basri, and Tijaniyah, "Designing Maximum Power Point Tracking (Mppt) Control On Prototype Traffic Light System Using Pid Control," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 5, no. 2, pp. 109–118, 2020.
- [5] M. Otong and R. M. Bajuri, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Buck-Boost Converter," *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-Elektron.-Telekomun.-Komput.*, vol. 5, no. 2, pp. 103-110, 2017.
- [6] E. Tridianto and T. R. Widcaksono, "Maximum Power Point Tracking dengan Algoritma Perturb and Observation untuk Turbin Angin," *Jurnal Ilmiah SETRUM, Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya*, vol. 5, pp. 4, 2016.
- [7] V. Jaya, "Perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Turbin Angin PMSG Kapasitas 300 Watt Dengan Algoritma Fuzzy," *Jurnal Maestro*, vol. 1, no. 2, pp. 323-329, 2018.
- [8] I. Diko and S. Yahya, "Perancangan dan Simulasi Maximum Power Point Tracking Pada Generator Sinkron Magnet Permanen Dengan Metode Logika Fuzzy," *SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan)*, vol. 3, pp. 118-127, 2021.
- [9] M. M. Mahmoud, M. M. Aly, H. S. Salama, and A.-M. M. Abdel-Rahim, "Dynamic evaluation of optimization techniques-based proportional-integral controller for wind-driven permanent magnet synchronous generator," *Wind Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 696-709, 2021.
- [10] U. Yilmaz, A. Kircay, and S. Borekci, "PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 994–1001, 2018.

