

Rancang Bangun Kendali Konverter Empat Kuadran untuk Motor DC dengan *Interface* GUI Matlab

Dahlia Hidul Fitri^{1*}, Krismadinata^{1,2}, Kathleen Eborá Padrigalan²

¹Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

²Ceper Centre for Energy and Power Electronics Research, Universitas Negeri Padang

Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*e-mail: dahliahidulfitri91@gmail.com

(Diajukan: 24 Juli 2024, direvisi: 07 Agustus 2024, disetujui: 01 Oktober 2024, dipublikasikan: 26 Oktober 2024)

Abstrak

Motor listrik, khususnya motor DC, mempunyai peran penting dalam proses produksi industri untuk mencapai hasil optimal. Motor DC digunakan dalam berbagai aplikasi industri seperti *conveyor*, elevator, dan peralatan tekstil karena kemudahan pengaplikasian dan skala pengaturan kecepatan yang lebih lebar dibandingkan motor arus bolak-balik. Namun, penurunan kecepatan akibat beban sering menjadi masalah sehingga diperlukan sistem pengendalian, seperti kendali konverter empat kuadran (*DC chopper*), untuk mengatur arah putaran dan pengereman serta kecepatan motor DC. *DC chopper* mengubah tegangan DC menjadi tegangan DC variabel yang dapat dikendalikan, dan *DC chopper* empat kuadran memungkinkan kontrol tegangan motor DC pada empat daerah (positif atau negatif). Dalam penelitian ini, *DC chopper* digunakan untuk mengendalikan tegangan motor DC yang diintegrasikan dengan *interface* GUI Matlab untuk monitoring sistem. GUI Matlab dapat pengoperasian alat menggunakan komputer tanpa perlu mengaktifkan saklar manual, sehingga proyek ini dapat dijalankan dengan dua metode. Pada penelitian ini, pengujian sistem kendali konverter empat kuadran untuk motor DC dilakukan dengan *interface* GUI Matlab.

Kata Kunci: *DC chopper* 4 kuadran, motor DC, GUI Matlab.

Abstract

Electric motors, especially DC motors, play an important role in industrial production processes to achieve optimal results. DC motors are used in various industrial applications such as conveyors, elevators, and textile equipment due to their ease of application and wider speed regulation scale compared to alternating current motors. However, speed degradation due to load is often a problem so a control system, such as a four-quadrant converter control (DC chopper), is needed to regulate the rotation and braking direction and speed of DC motors. A DC chopper converts a DC voltage into a controllable variable DC voltage, and a four-quadrant DC chopper allows control of the DC motor voltage in four regions (positive or negative). In this research, a DC chopper is used to control the DC motor voltage integrated with a Matlab GUI interface for system monitoring. The Matlab GUI allows operation of the device using a computer without the need to activate a manual switch, so this project can be run using two methods. In this research, testing of the four-quadrant converter control system for DC motors was conducted with the Matlab GUI interface.

Keywords: *DC chopper* 4 quadrant, DC motor, Matlab GUI.

PENDAHULUAN

Teknologi otomatisasi di industri berkembang pesat dengan munculnya peralatan canggih yang meningkatkan kualitas produk dan efisiensi [1]. Motor listrik, terutama motor DC, banyak digunakan sebagai alat penggerak di industry untuk proses produksi mekanis yang optimal [2] [3]. Motor DC digunakan dalam *conveyor*, elevator, peralatan bawah air, dan pembuatan kertas, karena kemudahan aplikasi dan rentang pengaturan kecepatan yang lebih luas dibandingkan motor AC [4]. Namun, beban dapat menyebabkan kecepatan motor DC tidak konstan [5] [6], sehingga diperlukan sistem pengendalian seperti pemodelan *DC chopper* empat kuadran untuk mengatur kecepatan dan arah putaran motor DC.

DC chopper adalah rangkaian elektronik yang mengubah sumber listrik DC menjadi listrik DC variabel [5]. Terdapat tiga jenis *DC chopper*, yaitu satu kuadran, dua kuadran, dan empat kuadran [7]. *DC chopper* banyak digunakan untuk mengendalikan peralatan listrik dengan sumber tegangan DC, seperti motor DC. Pada tugas akhir ini, digunakan *DC chopper* empat kuadran yang terdiri dari empat saklar semikonduktor dan empat dioda, dengan arus dan tegangan output yang dapat berada pada empat daerah (positif atau negatif) [8].

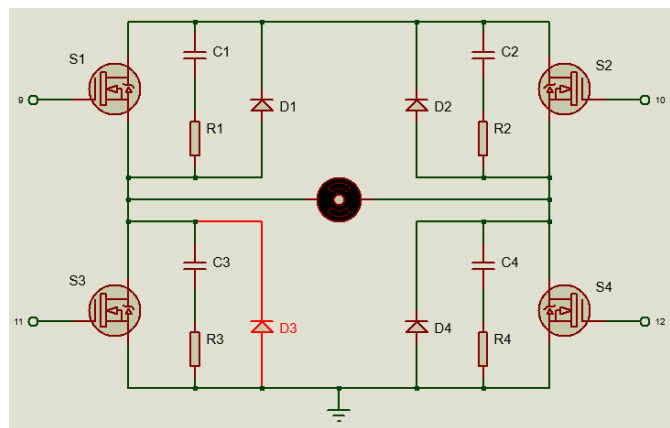
Setelah mendapatkan *output* sistem yang sesuai dengan bantuan *DC chopper*, digunakan *interface* GUI Matlab untuk monitoring sistem, sehingga memungkinkan pengoperasian alat menggunakan komputer/laptop tanpa harus mengaktifkan saklar manual. Kesimpulannya, tugas akhir ini dapat dijalankan dengan dua metode. Berdasarkan latar belakang ini, penulis merancang bangun proyek kendali konverter (*DC chopper*) empat kuadran untuk Motor DC dengan *Interface* GUI Matlab.

METODE

Penelitian ini tentang merancang, membangun, dan menguji sistem kendali konverter empat kuadran untuk motor DC dengan *interface* GUI Matlab yang diimplementasikan dengan Arduino mega 2560. Motor DC yang ingin dikendalikan adalah jenis motor DC penguatan terpisah. Dalam pengoperasiannya, motor DC penguatan terpisah memiliki dua sumber tegangan yang terpisah, yang terdiri dari sumber tegangan untuk kumparan jangkar dan sumber tegangan pada kumparan medan [9]. Pengaturan kecepatan motor DC dilakukan dengan mengatur tegangan jangkar motor, hal ini sesuai dengan persamaan kecepatan yang dirumuskan dalam persamaan 1 berikut:

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{T_a} \quad (1)$$

Dimana T_a , I_a , dan R_a adalah torsi elektromagnetik, arus jangkar dan tahanan jangkar. Sehingga kecepatan motor dapat dikendalikan dengan pengaturan tegangan jangkar, dimana tegangan jangkar ini dapat di atur dengan menggunakan konverter daya [4]. Jenis konverter daya yang digunakan pada penelitian ini, yaitu konverter DC-DC empat kuadran atau disebut juga dengan *DC chopper* empat kuadran.



Gambar 1. DC chopper empat kuadran

Gambar 1 menunjukkan bahwa *DC chopper* empat kuadran terdiri dari empat buah semikonduktor yang disusun dalam bentuk rangkaian *H-bridge*, dimana perangkat semikonduktor yang digunakan berupa MOSFET, transistor dan *thyristor* yang merupakan perangkat yang dapat melakukan *switching* pada frekuensi tinggi dengan penurunan tegangan yang relative rendah. Kecepatan motor DC dikendalikan dengan mengatur tegangan keluaran *DC chopper* melalui pengaturan modulasi *switch converter*, dimana modulasi *switch converter* ini diatur dengan metode *Pulse Width Modulation (PWM)* dengan menggunakan arduino. Dalam pengaturan *switching* pada masing-masing kuadran dapat diklasifikasikan bahwa pada kuadran 1, S1 modulasi, S4 aktif, S2 dan S3 mati. Pada kuadran 2, S2 aktif dan S1, S3, S4 mati. Pada kuadran 3, S2 modulasi, S3 aktif, S1 dan S4 mati. Dan terakhir pada kuadran 4, S4 aktif dan S1, S2, S3 mati [10].

Konverter DC-DC (*DC Chopper*)

Perkembangan teknologi memungkinkan konversi tegangan DC variabel menggunakan konsep *switching*, yang dikenal dengan *DC chopper*. Konverter DC-DC atau *DC chopper* adalah rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah tegangan listrik DC menjadi tegangan DC dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur [11]. Konverter DC-DC menggunakan komponen semikonduktor seperti SCR, transistor BJT, atau MOSFET sebagai saklar elektronis, dimana operasinya diatur oleh rangkaian pemicu berupa gelombang pulsa. Pengaturan tegangannya bisa dilakukan melalui metode PWM, baik didalam maupun diluar konverter [8].

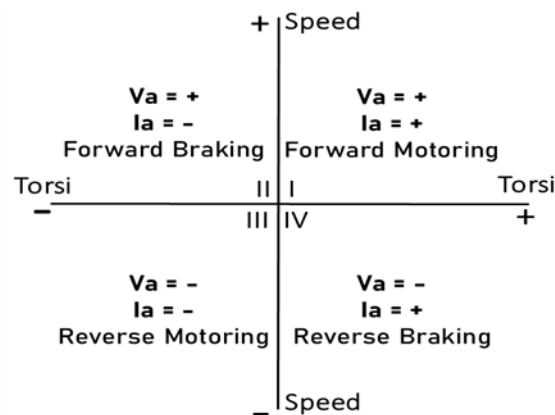
Klasifikasi *DC chopper*:

- DC chopper* kelas A: Beroperasi di kuadran I dengan arus dan tegangan positif.
- DC chopper* kelas B: Beroperasi di kuadran II, dengan tegangan beban positif dan arus beban negatif [8].
- DC chopper* kelas C: Kombinasi dari *DC chopper* kelas A dan B, dapat beroperasi sebagai penyearah atau *inverter* [8].
- DC chopper* kelas D: Beroperasi di kuadran I dan IV, arus beban selalu positif dan tegangannya bisa positif atau negatif, juga berfungsi sebagai *inverter* [8].
- DC chopper* kelas E: Beroperasi di semua kuadran (I, II, III, dan IV), arus dan tegangan beban bisa positif atau negatif [8].

Operasi Motor DC Empat Kuadran

Operasi empat kuadran pada motor DC berarti bahwa motor DC dapat beroperasi dalam empat keadaan, yaitu *forward motoring*, *forward braking*, *reverse motoring*, dan

reverse braking [12] [3]. Pada mode *motoring*, mesin beroperasi sebagai motor dan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sedangkan dalam mode *braking*, mesin bekerja sebagai generator dan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [13]. Untuk lebih jelasnya pengoperasian dari operasi multi kuadran dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



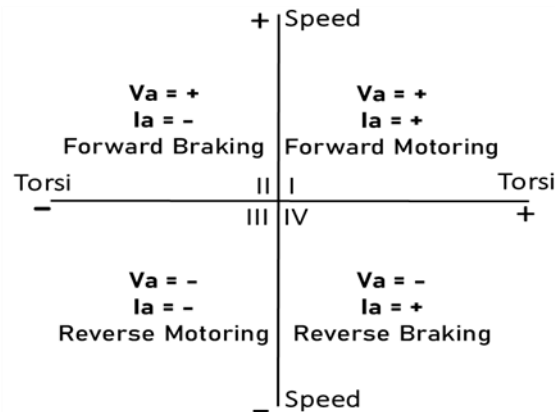
Gambar 2. Operasi motor DC empat kuadran

Dari gambar 2 diketahui operasi kuadran I (*forward motoring*), memiliki torsi dan kecepatan positif, sehingga mesin beroperasi sebagai motor dengan rotasi searah jarum jam (*Clock Wise Rotation, CW*). Dalam operasi ini, tegangan dan arus jangkar motor positif selama proses asutan maju (*forward starting*). Pada operasi kuadran II (*forward braking*), kecepatan tetap positif tetapi torsi negatif, sehingga torsi digunakan untuk pengereman putaran motor, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan beroperasi sebagai generator. Selama pengereman maju, tegangan jangkar positif dan arus jangkar negatif, dengan rotasi tetap CW. Operasi kuadran III (*reverse motoring*), di mana mesin beroperasi sebagai motor dengan tegangan dan arus jangkar negatif selama asutan berbalik arah (*reverse starting*), serta kecepatan dan torsi berlawanan (negatif), sehingga rotasinya berlawanan arah jarum jam (*Counter Clock Wise Rotation, CCW*). Pada kuadran IV (*reverse braking*), kecepatan negatif dan torsi positif, digunakan untuk pengereman putaran motor berlawanan arah, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan beroperasi sebagai generator [14]. Selama pengereman balik, tegangan jangkar negatif dan arus jangkar positif, dengan rotasi tetap CCW[15].

PWM

PWM (*Pulse Width Modulation*) atau dalam bahasa Indonesia disebut dengan Modulasi Lebar Pulsa adalah salah satu dari teknik modulasi dengan cara mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) menjadi nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap [12]. *Duty cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk persamaan (%), dengan *range* dari 0% sampai *range* 100% [6]. Terdapat beberapa keuntungan dalam penggunaan PWM, yaitu hilangnya daya dalam perangkat yang berpindah mungkin sangat rendah. Saat transfer mati, praktis dan tidak ada arus, sedangkan saat aktif, hampir tidak ada penurunan tegangan diseluruh sakelar. PWM juga bekerja dengan baik pada kontrol digital, karena sifatnya ON/OFF dapat dengan mudah dalam mengatur siklus kerja yang diinginkan[15]. Dengan mudahnya dalam

mengendalikan siklus kerja atau *duty cycle* PWM ini, maka kita dapat menetapkan berapa lama kondisi ON harus bertahan [12].



Gambar 3. Bentuk sinyal PWM

Untuk menghitung siklus kerja atau *duty cycle* dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$Duty\ cycle = t_{ON} / (t_{ON} + t_{OFF}) \quad (2)$$

atau

$$Duty\ cycle = t_{ON} / t_{total} \quad (3)$$

Dimana :

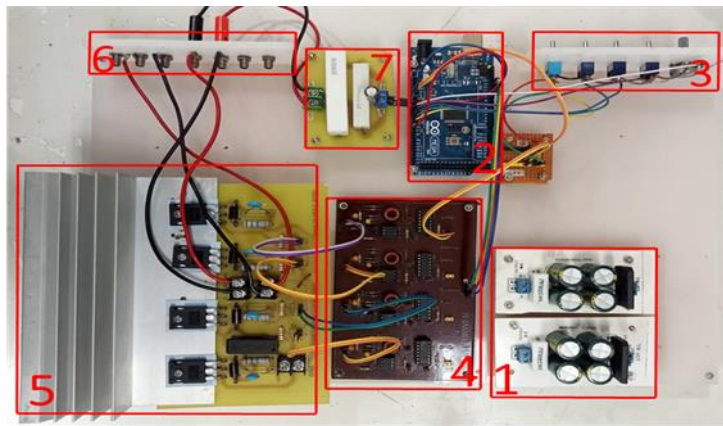
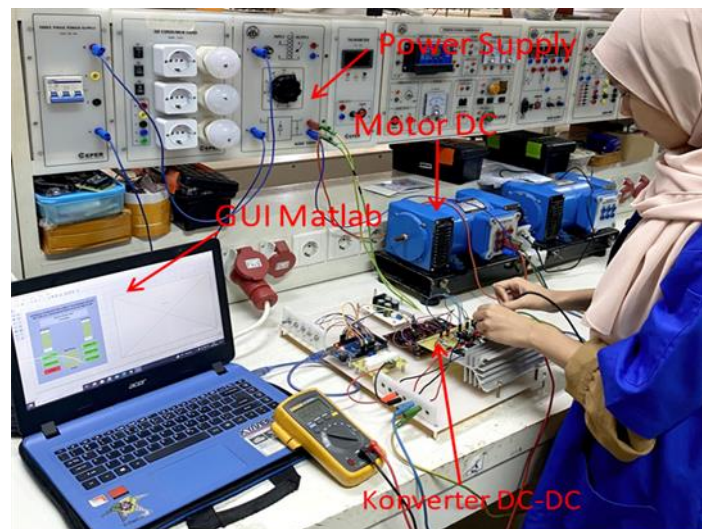
t_{ON} = waktu ON atau waktu saat tegangan keluaran pada posisi tinggi (*high*)

t_{OFF} = waktu OFF atau waktu saat tegangan keluaran pada posisi rendah (*low*)

t_{total} = waktu satu siklus atau disebut juga dengan periode satu gelombang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian alat kendali konverter empat kuadran untuk motor DC dengan menggunakan *interface* GUI matlab. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan kuadran 1, kuadran 2, kuadran 3 dan kuadran 4, sehingga didapatkan pengendalian pada kecepatan, pengereman dan arah putaran motor DC penguat terpisah. Untuk gambar rangkaian keseluruhan alat dapat dilihat pada gambar 4 dan gambar 5 berikut.

Gambar 4. Bentuk *hardware* alat

Gambar 5. Gambar keseluruhan alat

Prinsip kerja alat:

- 1) Ketika alat akan dihidupkan semua komponen sistem dalam keadaan *standby*.
- 2) Koneksikan Arduino Mega 2560 dengan GUI Matlab.
- 3) Penelitian ini memiliki dua cara dalam mengoperasikan alat, yaitu yang pertama dengan mengaktifkan komponen *switch* kuadran berapa yang akan dijalankan agar motor DC penguat terpisah beroperasi sesuai dengan keadaan yang diinginkan. Sedangkan cara kedua dengan *interface* GUI Matlab, untuk menjalankan alatnya dilakukan dengan mengaktifkan *push button* kuadran yang terdapat pada tampilan GUI Matlab yang telah didesain dan diberikan program sebelumnya. Berikut penjelasan keadaan masing-masing *switch* kuadran atau *push button* kuadran ketika diaktifkan:
 - a. Saat *switch* atau *push button* kuadran I diaktifkan maka kuadran I akan aktif. Kemudian set poin nilai kecepatan diberikan dengan menggunakan potensiometer atau pada GUI Matlab dengan mengatur nilai dan Arduino Mega 2560 akan membaca nilai ADC lalu pada program diberikan perintah untuk mengkonversikan nilai ADC menjadi *output* PWM untuk mengaktifkan *gate drive* 1 dan 4. *Gate drive* ini difungsikan untuk mengaktifkan MOSFET 1 dan MOSFET 4. Pada kondisi ini motor DC berputar searah jarum jam (*forward*).

- b. Saat *switch* atau *push button* kuadran II diaktifkan maka kuadran 2 akan aktif. Keadaan pada kuadran 2 ini, yaitu motor DC yang pada awalnya berputar searah jarum jam akan berhenti perlahan (*break*), dengan syarat *switch* 1,3, dan 4 harus dalam keadaan nonaktif.
 - c. Saat *switch* atau *push button* kuadran III diaktifkan maka kuadran 3 akan aktif. Pada saat kuadran 3 ini diaktifkan prinsipnya hampir sama dengan kuadran 1, tetapi yang aktif adalah *gate drive* 2 dan 3 yang juga mengaktifkan MOSFET 2 dan MOSFET 3, sehingga polaritas motor DC akan terbalik dari kondisi sebelumnya. Oleh karena itu, motor akan berputar berlawanan arah jarum jam (*reverse*).
 - d. Saat *switch* atau *push button* kuadran IV diaktifkan maka kuadran 4 akan aktif. Prinsipnya hampir sama dengan kuadran 2, dimana motor akan melakukan pengereman pada saat motor beroperasi pada kuadran 3. Dengan syarat *switch* kuadran 1,2, dan 3 nonaktif.
- 4) Lalu sensor tegangan akan membaca tegangan pada *output* konverter empat kuadran, kemudian hasil pembacaan dan grafik dari sensor tegangan akan ditampilkan pada GUI Matlab.

Pengujian *Gate Drive*

Gate drive pada alat berfungsi sebagai penguat sinyal PWM yang dihasilkan Arduino, karena sinyal yang diperoleh dari arduino tidak cukup kuat untuk mengoperasikan MOSFET, maka diperlukan *gate drive* untuk menguatkan sinyal PWM sesuai dengan kebutuhan daya operasi pada MOSFET.

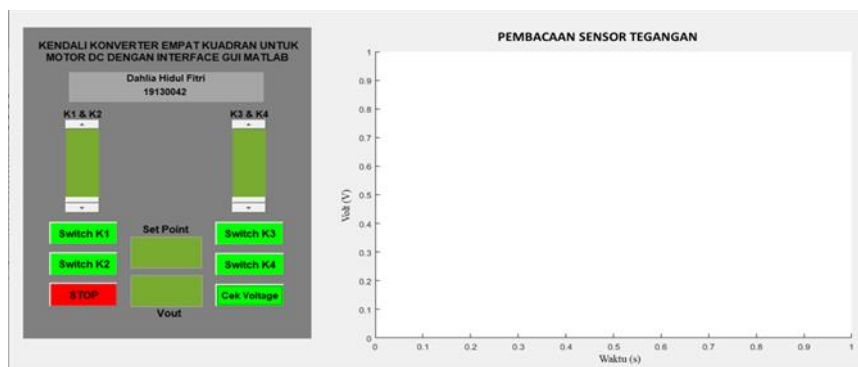
Tabel 1. Pengujian *Gate Drive*

Gate Drive	OFF (VDC)	ON (VDC)
Gate drive 1	0.00	13.64
Gate drive 2	0.00	13.92
Gate drive 3	0.00	14.02
Gate drive 4	0.00	13.86

Pengujian pada *gate drive* dilakukan dengan memberikan *input* sinyal PWM Arduino Mega, sehingga dapat dilakukan pengukuran pada tegangan *output gate drive*. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian pengendali untuk MOSFET dapat beroperasi dengan baik. Pengukuran tegangan maksimal *gate drive* dengan memberikan *duty cycle* 100% dapat dilihat pada tabel 1 diatas.

Pengujian Kendali Konverter Empat Kuadran untuk Motor DC dengan *Interface GUI Matlab*

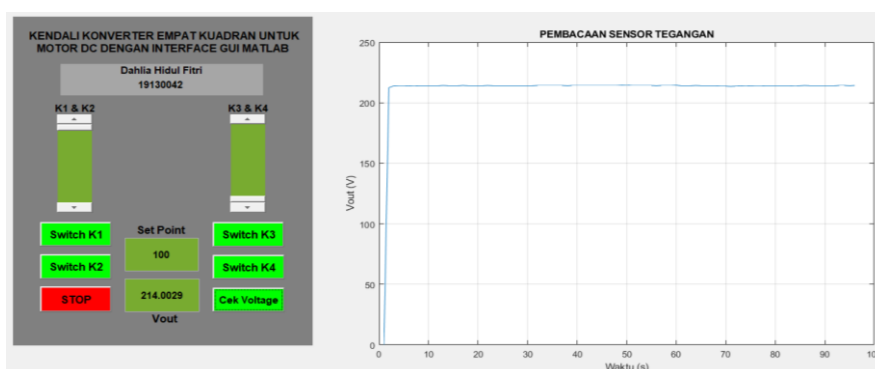
Pengujian alat kendali konverter empat kuadran untuk motor DC penguat terpisah dilakukan dengan menggunakan *interface GUI matlab* yang telah di desain dan di berikan perintah program sebelumnya. Tujuan pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik motor DC saat dioperasikan dengan menggunakan konverter DC-DC empat kuadran. Tampilan GUI Matlab dapat dilihat pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Tampilan GUI matlab

Hasil pengujian alat pada masing-masing kuadran:

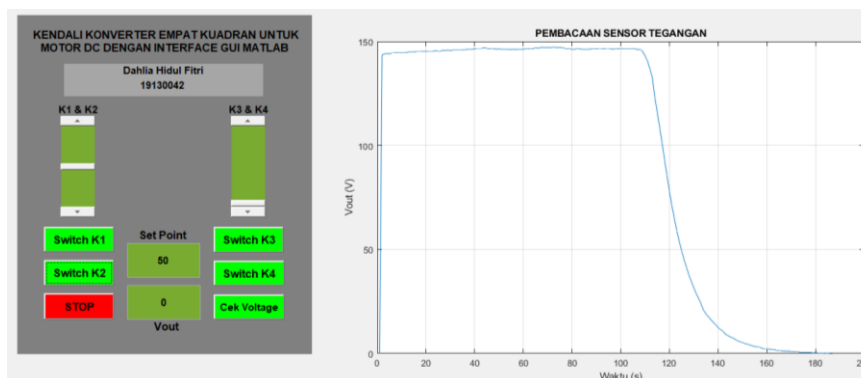
a. Kuadran I (*forward motoring*)



Gambar 7. Tampilan GUI matlab pada kuadran 1

Pengujian pada kuadran I dilakukan dengan mengaktifkan *Switch K1* dengan perintah program di GUI matlab untuk mengaktifkan *gate drive 1* dan *gate drive 4* yang difungsikan untuk mengaktifkan MOSFET 1 dan MOSFET 4, sedangkan *gate drive 2* dan 3 dalam kondisi *off*. Pada operasi kuadran I ini motor DC penguat terpisah menghasilkan torsi dan kecepatan positif, karena arah kecepatannya positif maka rotasi motor searah dengan jarum jam (*Clock Wise Rotation*). Pada gambar 7 dapat dilihat nilai dan grafik dari tegangan *output DC chopper* pada pengaturan *duty cycle 100%*.

b. Kuadran II (*forward braking*)

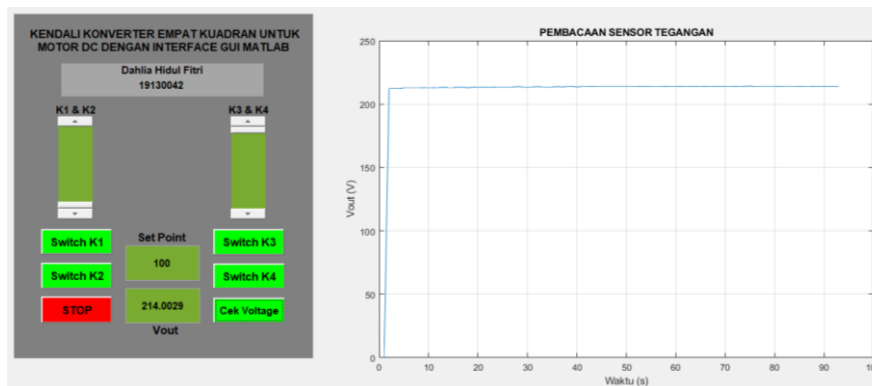


Gambar 8. Tampilan GUI matlab pada kuadran 2

Pengujian pada kuadran II dilakukan dengan mengaktifkan *Switch K2* dengan perintah program di GUI matlab untuk mengaktifkan *gate drive 2* yang difungsikan untuk mengaktifkan MOSFET 1, sedangkan *gate drive 1, 3* dan 4 dalam kondisi *off*. Operasi

kuadran II ini merupakan pengereman dari operasi motor DC pada kuadran I. Karena pada kuadran II memiliki torsi motor negatif, maka dari torsi ini digunakan untuk pengereman pada putaran motor.

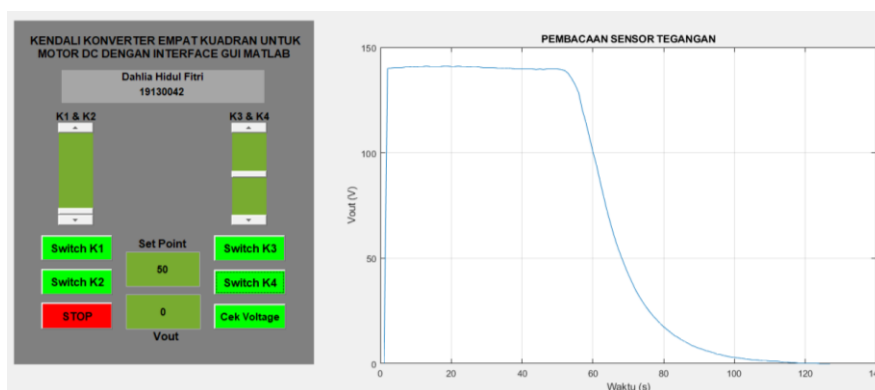
c. Kuadran III (*reverse motoring*)



Gambar 9. Tampilan GUI matlab pada kuadran 3

Pengujian pada kuadran III dilakukan dengan mengaktifkan *Switch K3* dengan perintah program di GUI matlab untuk mengaktifkan *gate drive 2* dan *gate drive 3* yang difungsikan untuk mengaktifkan MOSFET 2 dan MOSFET 4, sedangkan *gate drive 1* dan 4 dalam kondisi *off*. Pada operasi kuadran III ini motor DC penguat terpisah menghasilkan torsi dan kecepatan negatif, karena arah kecepatannya negatif maka rotasi motor berlawanan arah dengan jarum jam (*CCW Rotation*). Pada gambar 9 dapat dilihat nilai dan grafik dari tegangan output *DC chopper* pada pengaturan *duty cycle 100%*.

d. Kuadran IV (*reverse braking*)



Gambar 10. Tampilan GUI matlab pada kuadran 4

Pengujian pada kuadran IV dilakukan dengan mengaktifkan *Switch K4* dengan perintah program di GUI matlab untuk mengaktifkan *gate drive 4* yang difungsikan untuk mengaktifkan MOSFET 4, sedangkan *gate drive 1, 2* dan *3* dalam kondisi *off*. Operasi kuadran IV ini merupakan pengereman dari operasi motor DC pada kuadran III.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini merancang, membangun dan menguji sistem kendali konverter empat kuadran untuk motor DC penguat terpisah dengan menggunakan *interface* GUI matlab serta menampilkan pembacaan dan grafik dari sensor tegangan yang digunakan pada GUI matlab. Dari hasil pengujian dan pembahasan diatas, menunjukkan bahwa sistem kendali

konverter empat kuadran untuk motor DC dengan *interface* GUI matlab dapat dioperasikan dan telah bekerja dengan baik, dimana motor beroperasi sesuai dengan karakteristik masing-masing kuadran, yaitu kuadran 1 (*forward motoring*), kuadran 2 (*forward braking*), kuadran 3 (*reverse motoring*) dan kuadran 4 (*reverse braking*), serta kecepatan motor dapat dikendalikan dengan mengatur tegangan pada konverter DC-DC (*DC chopper*) empat kuadran.

REFERENSI

- [1] H. Mandala *et al.*, “299900158,” 2015.
- [2] M. P. Darmawan and N. Soedjarwanto, “Analisis Sistem Kontrol Kecepatan Motor Dc Pada Rotary Kiln Menggunakan Dc Variabel Speed Drive Di Industri Semen,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i1.2861.
- [3] R. A. Dinde, A. A. Dubal, S. S. Kamble, and A. A. Mulla, “International Journal of Research Publication and Reviews FOUR QUADRANT OPERATION OF DC MOTOR,” 2024. [Online]. Available: www.ijrpr.com
- [4] M. I. Esario and M. Yuhendri, “Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan DC Chopper Satu Kuadran Berbasis Kontroller PI,” *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, p. 296, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i1.108005.
- [5] R. S. Zulkifli, “Pengaruh Kendali Kecepatan Motor DC Pada Chopper Drive,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 8, no. 2, pp. 39–43, 2021, doi: 10.21107/triac.v8i2.11277.
- [6] R. Muhandian, “JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL) Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic”, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [7] *et al.*, “Implementation of Chopper Fed Speed Control of Separately Excited DC Motor Using PI Controller,” *International Journal Of Engineering And Computer Science*, no. March, 2017, doi: 10.18535/ijecs/v6i3.42.
- [8] Muhammad Ali, “Aplikasi Elektronika Daya,” 2018.
- [9] K. D. Kecepatan Motor Penguat Terpisah Berbeban Berbasis and D. Taufiq Arif, “JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL).” [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [10] M. Safe, dan Krismadinata, and N. Padang JIProf Hamka, “DC-DC chopper 4 Kuadran Untuk Penggerak Motor DC Penguat Terpisah,” *MSI Transaction on Education*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2023.
- [11] “m muskhaful imam 2021_J Pengaruh Kendali Kecepatan Motor DC Pada CHOPPER DRIVE”.
- [12] V. Kumar, R. Jha, and M. Tech, “Four Quadrant Speed Control of DC Motor with the Help of AT89S52 Microcontroller,” *Journal for Research*, vol. 01, p. 8, 2015, [Online]. Available: www.ijirst.org
- [13] A. Chaithanakulwat, N. Thungsuk, T. Savangboon, S. Panpit, and S. Boontua, “The Speed Control of Four-Quadrant DC Motor with a PI Control Topology,” *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, vol. 48, no. 4, 2021.
- [14] R. Sutrisno, T. Jurusan Teknik Elektronika, and P. Negeri Malang Jalan Soekarno Hatta, “RANCANG BANGUN DRIVER MOTOR DC OPERASI 4 KUADRAN (STARTING, BRAKING, STOPPING, REVERSING).”
- [15] R. Valunjkar, K. Teke, S. Vasoliya, A. Ubale, and V. Dabholkar, “Four Quadrant Dc Motor Drive,” vol. 8, pp. 47–50, 2018.