

Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan DC Chopper Satu Kuadran Berbasis Kontroller PI

Muhamad Ilham Esario^{1*}, Muldi Yuhendri²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

*Corresponding author, e-mail: ilhamesario@gmail.com

Abstrak

Motor DC adalah salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan di industri untuk menunjang proses produksi. Kecepatan motor DC perlu dikendalikan agar dapat beroperasi sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Dalam paper ini diusulkan sistem kendali motor DC menggunakan DC chopper satu kuadran berbasis kontroller *Proportional Integral* (PI). Sistem kendali diimplementasikan dengan menggunakan mikrokontroller arduino mega 2560 yang diprogram melalui Simulink Matlab. Peralatan system kendali juga dilengkapi dengan keypad sebagai input kecepatan referensi dan LCD sebagai media untuk menampilkan data kecepatan. Rancangan sistem kendali motor DC yang diusulkan diverifikasi melalui eksperimen di laboratorium dengan kecepatan rotor yang bervariasi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa rancangan sistem kendali motor DC menggunakan DC chopper satu kuadran berbasis kontroller PI yang diusulkan dalam paper ini telah bekerja dengan baik. Hal ini dapat dilihat dari respon kecepatan motor yang beroperasi sesuai dengan kecepatan referensi yang diinputkan melalui keypad.

Abstract

DC motor is one type of electric motor that is widely used in industry to support the production process. The DC motor speed must be controlled so that it operates in accordance with the desired speed. In this paper, The DC motor control system is proposed using an one quadrant DC chopper based on proportional Integral (PI) controller. The control system is implemented using the arduino mega 2560 microcontroller, which is programmed through Matlab Simulink. Control system devices is also equipped with a keypad for input speed reference and LCD for displaying the speed data. The proposed design in this study was verified through experiments in a laboratory with varying rotor speeds. The experimental results show that the design of a DC motor control system using an one quadrant DC chopper based PI controller has worked in accordance with the objectives. This can be seen from the speed response of the motor that operating in accordance with the reference speed inputted via the keypad.

Keywords: DC motor, DC chopper, Speed control, PI controller, Arduino

PENDAHULUAN

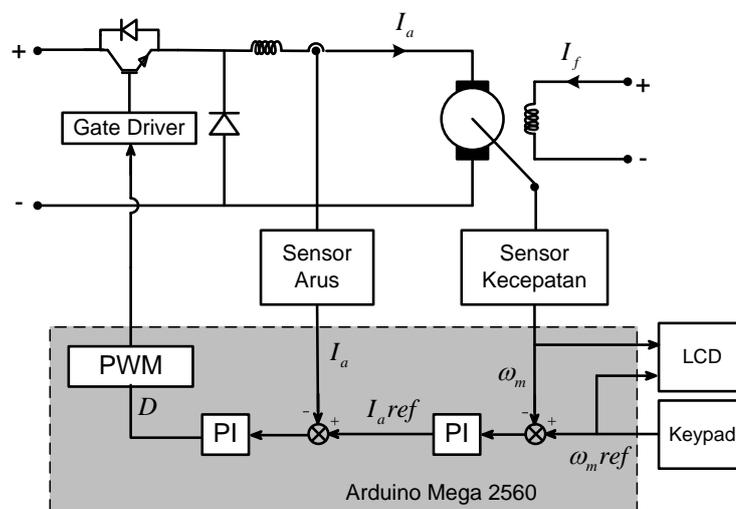
Motor DC adalah salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan untuk tenaga penggerak di industri. Hal ini karena keunggulan yang dimiliki oleh motor ini, seperti rentang pengaturan kecepatan putaran yang lebih lebar dibanding dengan motor arus bolak balik dan lebih mudah dikendalikan [1]. Untuk berbagai keperluan, kecepatan motor DC ini harus dikendalikan agar sesuai dengan kecepatan yang dibutuhkan. Kendali kecepatan motor DC dapat dilakukan dengan mengatur arus jangkar atau arus medan dari motor tersebut. Pengaturan arus ini dapat dilakukan dengan mengatur tegangan motor tersebut menggunakan konverter daya [2]. Beberapa converter daya yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC antara lain penyearah terkendali dan DC chopper. Dalam paper ini, pengendalian kecepatan motor DC diusulkan menggunakan DC chopper, yaitu sebuah peralatan konverter untuk tegangan DC, dimana konverter ini dapat mengendalikan tegangan output dari alat tersebut [3]. Ada beberapa jenis DC chopper, yaitu DC chopper satu kuadran, dua kuadran dan 4 kuadran. Jenis DC chopper yang digunakan tergantung bentuk operasi motor yang dikendalikan, sesuai dengan kuadran operasi motor DC. Dalam penelitian ini diusulkan DC

chopper satu kuadran untuk mengendalikan kecepatan motor untuk jenis operasi motoring maju pada kuadran satu. Kendali kecepatan motor dirancang dengan mengendalikan arus jangkar motor dengan cara mengatur tegangan stator melalui DC chopper satu kuadran. Pengaturan tegangan stator dengan DC chopper dilakukan dengan mengatur lebar pulsa modulasi switch konverter dengan metode Pulse Width Modulation (PWM) [4].

Kendali kecepatan motor DC telah diterapkan dengan beberapa metode, seperti metode PID [1] dan controller PI [5] serta implementasinya dengan arduino yang deprogram dengan arduino IDE [6]. Dalam penelitian ini, kecepatan motor dikendalikan dengan metode PI yang diimplementasikan dengan arduino mega 2560 berbasis Simulink Matlab, Rancangan sistem kendali akan diterapkan pada motor DC 2.2 KW dan diverifikasi dengan kecepatan yang bervariasi.

METODE

Dalam penelitian ini dirancang sistem kendali kecepatan motor DC menggunakan DC chopper satu kuadran yang diimplementasikan dengan arduino mega 2560. Kecepatan motor DC dikendalikan dengan cara mengatur arus jangkar dengan metode kontrol PI. Arus jangkar dikendalikan dengan mengatur tegangan keluaran DC chopper melalui pengaturan modulasi switch converter. Modulasi switch DC chopper ini diatur dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan menggunakan arduino. Lebar pulsa modulasi PWM ini dikendalikan dengan mengatur *dutycycle* yang merupakan output controller arus jangkar. Dalam konsep ini, ada dua loop kontrol yang digunakan, yaitu loop kontrol mekanik untuk mendapatkan arus jangkar referensi berdasarkan error kecepatan dan loop kontrol elektrik untuk mendapatkan *dutycycle* berdasarkan error arus jangkar. Gambar 1 menunjukkan skema sistem kendali kecepatan motor DC menggunakan DC chopper satu kuadran yang diimplementasikan dengan arduino mega 2560. Gambar 1 menunjukkan bahwa system kendali kecepatan terdiri dari motor DC yang dilengkapi dengan sensor kecepatan, sensor arus untuk membaca data arus jangkar motor (I_a), keypad sebagai media untuk memasukan nilai kecepatan referensi ($\omega_m ref$), LCD untuk menampilkan data kecepatan motor, DC chopper satu kuadran yang terdiri dari switch IGBT, gate driver, dioda dan induktor, blok controller yang diprogram dalam Simulink Matlab serta arduino uno sebagai antarmuka antara Simulink Matlab dalam PC dengan hardware rangkaian.

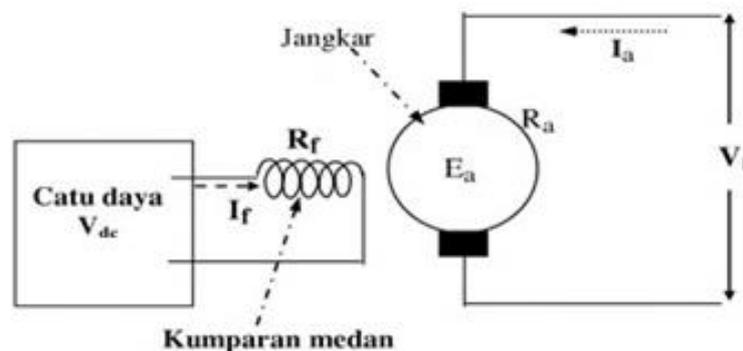


Gambar 1. Skema sistem kendali motor DC dengan controller PI

Gambar 1 juga menunjukkan bahwa system kendali kecepatan motor DC terdiri dari loop control kecepatan dengan kontroller PI untuk mendapatkan arus referensi dan loop kontrol arus berbasis kontroller PI untuk mendapatkan *dutycycle* PWM untuk modulasi switch DC chopper satu kuadran. Input kontroller PI untuk kendali arus jangkar adalah error arus jangkar yang diperoleh dengan cara membandingkan arus jangkar terukur (I_a) dari sensor arus dengan arus jangkar referensi (I_{aref}) dari output kontroller kecepatan, sedangkan input kontroller PI untuk kendali kecepatan adalah error kecepatan yang diperoleh dengan cara membandingkan kecepatan terukur (ω_m) dari sensor kecepatan dengan kecepatan referensi (ω_{mref}) yang diinputkan dari keypad. Rancangan system kendali kecepatan ini diimplementasikan dengan Simulink Matlab dan diterapkan pada motor DC penguat terpisah 2.2 KW.

1. Motor DC Penguat Terpisah

Motor DC penguat terpisah adalah salah satu jenis motor DC yang memiliki dua sumber tegangan secara terpisah untuk mengoperasikannya, yaitu tegangan untuk kumparan jangkar dan tegangan untuk kumparan medan. Gambar 2 menunjukkan skema motor DC penguat terpisah yang terdiri dari kumparan jangkar dan kumparan medan



Gambar 2. Rangkaian motor DC penguat terpisah

Kecepatan motor DC penguat terpisah (ω_m) secara umum dirumuskan dengan :

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

Dimana V_t , I_a , R_a dan T_a adalah tegangan terminal motor, arus jangkar, tahanan jangkar dan torsi elektromagnetik motor. Berdasarkan Persamaan (1) ini dapat disimpulkan bahwa pengendalian kecepatan motor DC dapat dilakukan dengan mengatur arus jangkar atau tegangan terminal motor. Pengaturan arus jangkar ini dapat diimplementasikan dengan konverter daya dengan mengatur modulasi switch konverter tersebut. Dalam penelitian ini, converter daya yang digunakan adalah DC chopper satu kuadran yang dapat mengoperasikan motor pada kuadran satu, yaitu operasi motoring maju.

2. DC Chopper Satu Kuadran

DC Chopper merupakan sebuah converter daya DC yang tegangan outputnya dapat dikendalikan, sehingga banyak digunakan untuk mengendalikan peralatan listrik yang menggunakan sumber tegangan DC, seperti motor DC [3]. Berdasarkan struktur switchnya, DC chopper terdiri dari DC chopper satu kuadran, dua kuaran dan empat kuadran [3]. Dalam

penelitian ini digunakan DC chopper satu kuadran yang dapat beroperasi pada kuadran satu pada sistem kuadran. Pada kuadran satu ini, motor hanya beroperasi pada arah putaran maju dengan arah tegangan dan arus juga maju, yang disebut juga dengan *forward current* dan *forward voltage*. Skema DC chopper satu kuadran ditunjukkan oleh Gambar 1, yang terdiri dari switch daya IGBT, inductor dan dioda.

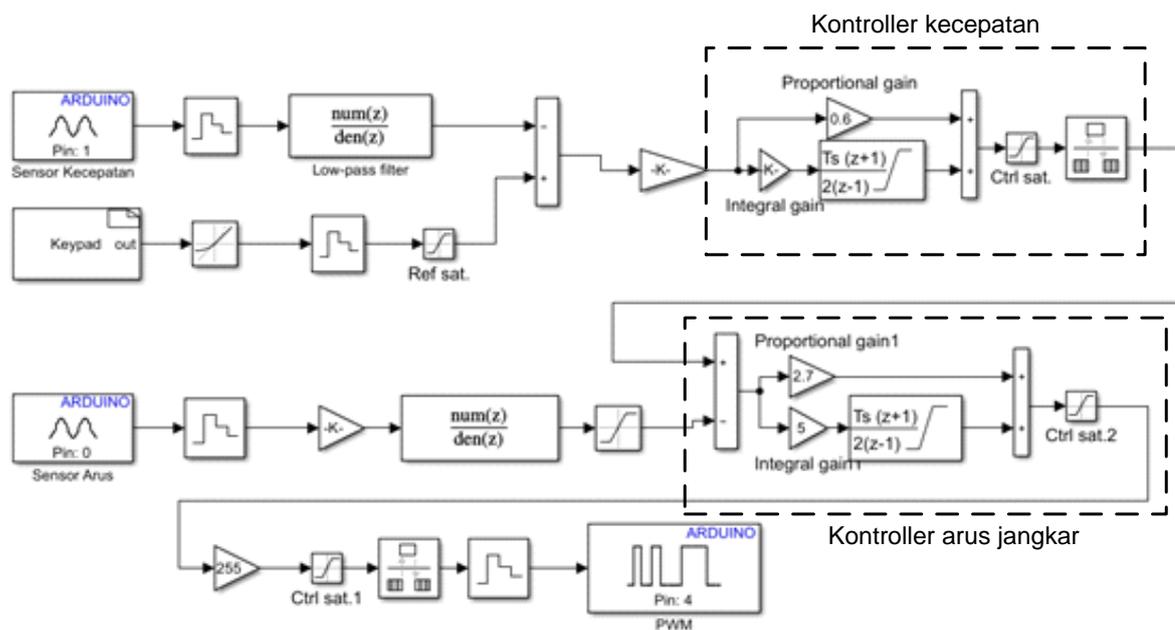
3. Kendali Kecepatan Motor DC

Kendali kecepatan motor DC yang diusulkan dalam paper ini adalah menggunakan controller PI, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Controller PI terdiri dari penguat *Proportional* (K_p) dan penguat *Integral* (K_i). Dalam paper ini ada dua controller PI yang digunakan, yaitu controller PI untuk kendali kecepatan dengan output arus jangkar referensi ($I_{a,ref}$) dan controller PI untuk kendali arus jangkar dengan output *duty cycle* PWM (D). Output kedua controller PI ini dapat dirumuskan dengan :

$$I_{a,ref} = K_p (\omega_m,ref - \omega_m) + \frac{K_i}{s} (\omega_m,ref - \omega_m) \tag{2}$$

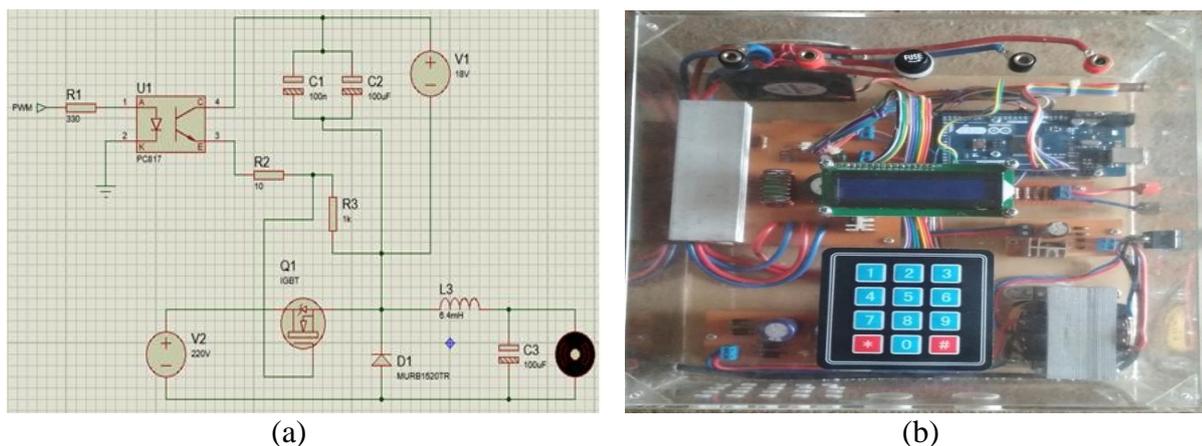
$$D = K_p (I_{a,ref} - I_a) + \frac{K_i}{s} (I_{a,ref} - I_a) \tag{3}$$

Rancangan kendali kecepatan motor ini diimplementasikan dengan software Simulink Matlab, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Sistem kendali kecepatan yang deprogram dalam Simulink ini memiliki tiga input eksternal, yaitu sensor arus dan sensor kecepatan yang dipresentasikan dengan blok input analog pada pin 0 dan pin 1 arduino serta keypad yang dipresentasikan dengan blok input keypad. Rancangan program ini memiliki satu output eksternal, yaitu sinyal PWM yang dipresentasikan dengan blok output PWM pada pin 4 arduino.



Gambar 3. Sistem kendali kecepatan motor DC dalam Simulink Matlab

Gambar 3 menunjukkan bahwa system kendali kecepatan motor DC dalam Simulink matlab dilengkapi dengan *low pass filter* untuk memfilter sinyal kecepatan dan arus dari sensor, limiter untuk membatasi nilai arus dan kecepatan agar tidak melebihi nilai rating motor, *sampling time* untuk menentukan waktu pengambilan data, dan blok-blok pendukung lainnya. Program kendali kecepatan motor DC yang dibuat dengan Simulink Matlab ini dihubungkan dengan rangkaian DC chopper satu kuadran melalui arduino mega 2560. Gambar 4(a) menunjukkan rancangan rangkaian DC chopper Gambar 4(b) menunjukkan hasil pembuatan rangkaian DC chopper untuk sistem kendali kecepatan motor DC yang diusulkan dalam penelitian ini.

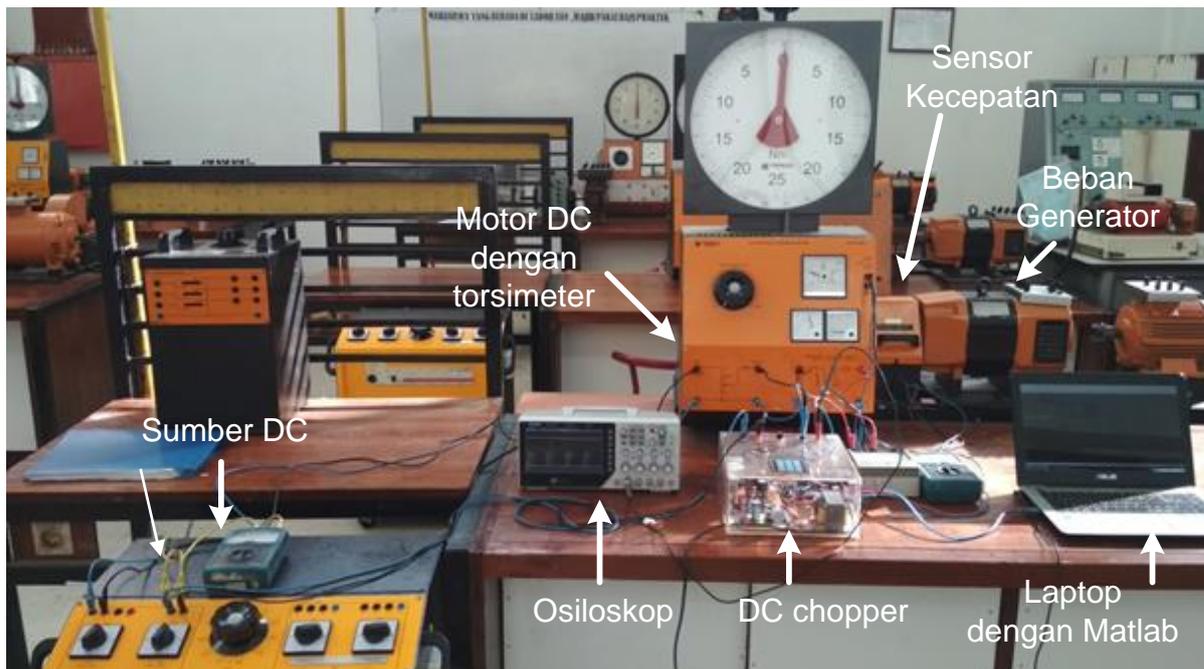


Gambar 4. Hardware system kendali kecepatan motor DC
(a) rancangan rangkaian DC chopper dan (b) implementasi hardware

Gambar 4(b) menunjukkan bahwa hardware sistem kendali kecepatan motor DC terdiri dari keypad, LCD, DC *chopper* satu kuadran, rangkaian *gate driver*, sensor arus, catu daya dan arduino mega 2560. Semua komponen ini ditempatkan dalam satu box, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4(b). Switch DC *chopper* satu kuadran dirancang menggunakan IGBT 1200 Volt 25 A, sedangkan *gate driver* nya menggunakan optocoupler PC817 yang dilengkapi dengan komponen asesoris lainnya. Untuk rangkaian sensor kecepatan ditempatkan langsung pada poros motor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kendali kecepatan motor DC dengan menggunakan DC *chopper* satu kuadran berbasis controller PI yang diusulkan dalam paper ini diuji secara realtime di laboratorium. Dalam pengujian ini digunakan motor DC Terco 2,2 KW yang dihubungkan dengan generator DC sebagai beban. Pengujian dilakukan dalam dua kali percobaan, yaitu percobaan beban konstan dengan kecepatan motor yang bervariasi dan percobaan kecepatan motor konstan dengan beban bervariasi. Gambar 5 menunjukkan instalasi percobaan sistem kendali motor DC yang diusulkan, yang terdiri dari motor DC Terco 2,2 KW yang dilengkapi dengan tachometer MV1025 dan sensor kecepatan, beban motor berupa generator DC yang terhubung langsung pada poros motor, box rangkaian DC *chopper* beserta asesorisnya, osiloskop untuk melihat gelombang tegangan *gate driver*, alat ukur voltmeter dan amperemeter, power suplai untuk suplai motor DC dan laptop yang dilengkapi dengan Simulink Matlab. Program Simulink ini juga dilengkapi dengan scope untuk melihat grafik kecepatan motor DC dan arus jangkar motor DC.

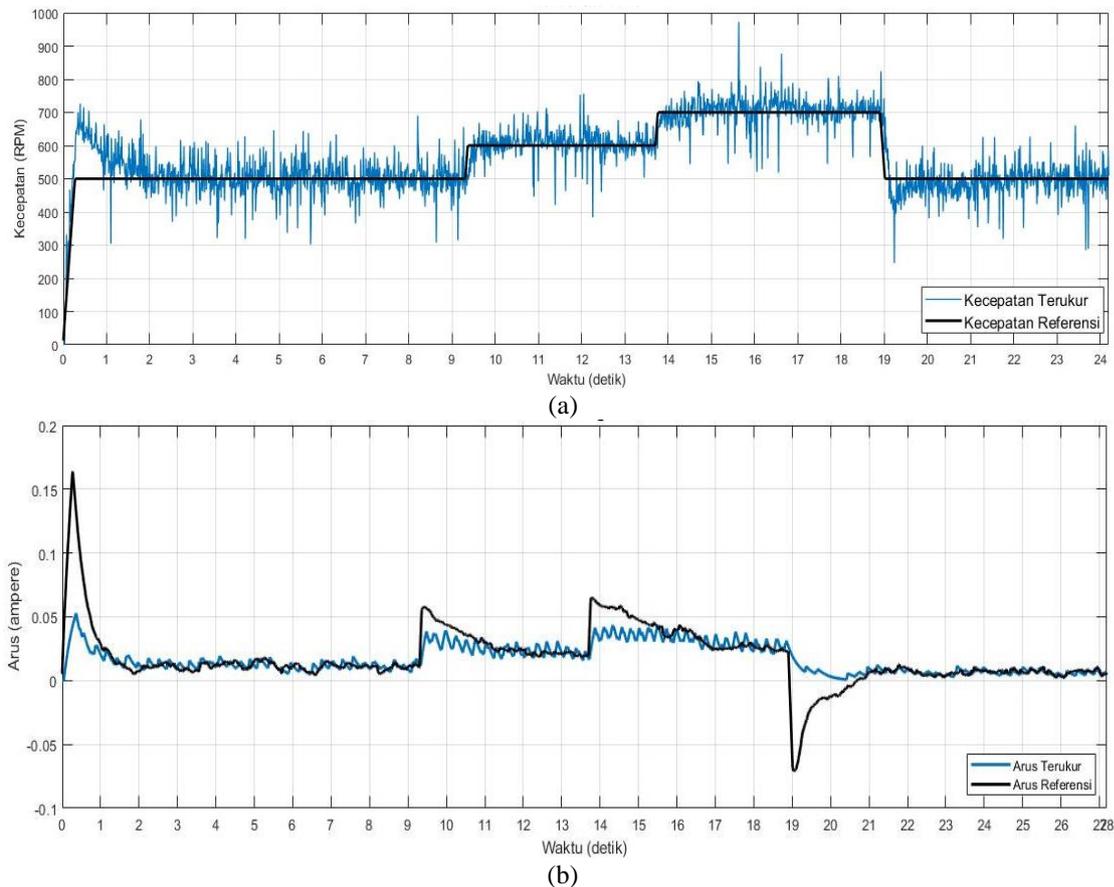


Gambar 5. Instalasi percobaan sistem kendali kecepatan motor DC

Gambar 6 menunjukkan grafik kecepatan motor dan arus jangkar pada percobaan pertama yang ditampilkan pada scope Simulink Matlab. Pada percobaan pertama ini, kecepatan referensi motor divariasikan dari 500 rpm pada kondisi awal, kemudian dinaikan menjadi 600 rpm pada waktu 9 detik dan dinaikan lagi menjadi 700 rpm pada waktu 13,7 detik dan kemudian diturunkan kembali menjadi 500 rpm pada waktu 19 detik, seperti yang ditunjukkan oleh grafik kecepatan referensi motor pada Gambar 6(a). Pada percobaan pertama ini, beban motor dibuat konstan, dimana generator DC yang dijadikan beban motor tidak dihubungkan dengan beban resistor eksternal, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.

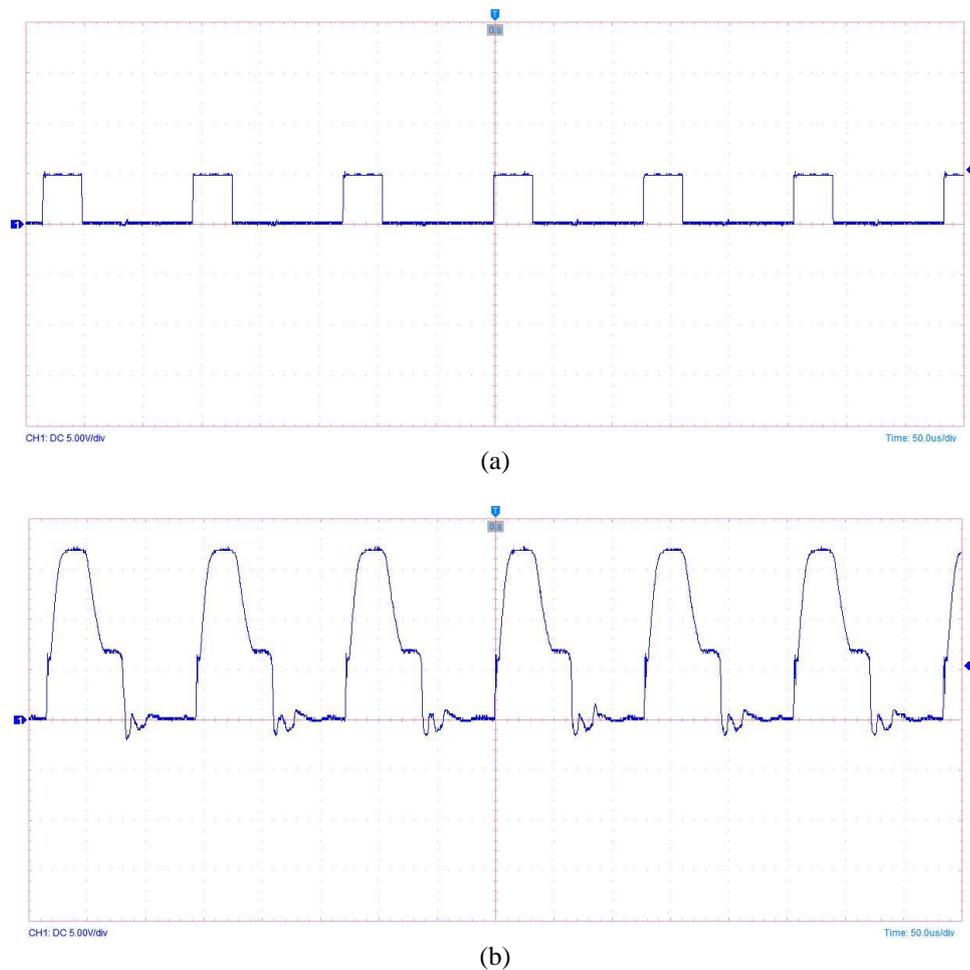
Grafik kecepatan motor pada Gambar 6(a) menunjukkan bahwa kecepatan aktual motor yang diukur dari sensor dapat mengikuti kecepatan referensi yang diinputkan pada keypad. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan motor DC telah sukses dikendalikan dengan menggunakan kontroller PI. Pada kondisi transien, error kecepatan motor mencapai 700 rpm dengan error 200 rpm. Kecepatan motor baru dapat mencapai nilai referensi 500 rpm pada kondisi tunak dalam waktu dua detik. Hal yang sama juga terjadi ketika kecepatan motor diturunkan dari 700 rpm menjadi 500 rpm pada waktu percobaan 19 detik. Pada kondisi ini terjadi lonjakan error kecepatan pada waktu transien, tetapi dapat mencapai nilai referensi kembali pada waktu tunak. Dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa rancangan system kendali motor DC menggunakan DC *chopper* satu kuadran berbasis kontroller PI yang diimplementasikan dengan arduino mega 2560 telah sukses mengendalikan kecepatan motor walaupun kecepatan motor tersebut divariasikan. Kesuksesan kendali kecepatan ini tidak terlepas dari kesuksesan kontroller PI dalam mengendalikan arus jangkar motor. Hal ini dapat dilihat dari respon arus jangkar motor yang ditunjukkan oleh Gambar 6(b). Kontroller PI telah sukses mengendalikan arus jangkar motor sesuai dengan arus jangkar referensi yang dihasilkan oleh kontroller kecepatan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6(b). Arus jangkar motor mengalami error yang besar pada kondisi transien, yaitu pada saat terjadi perubahan kecepatan referensi, namun arus jangkar tersebut dapat mencapai nilai referensi kembali pada kondisi tunak. Gambar 6(b) menunjukkan bahwa error maksimum arus jangkar terjadi pada

kondisi awal, yakni pada saat motor mulai beroperasi, namun nilainya masih di bawah nilai rating arus jangkar motor. Gambar 6(b) juga menunjukkan bahwa arus jangkar motor semakin besar ketika kecepatan motor dinaikan. Hal ini sesuai dengan Persamaan (1), bahwa kecepatan motor dapat dinaikan dengan menaikkan arus jangkar. Dengan kata lain, pengendalian kecepatan motor dapat dilakukan dengan mengendalikan arus jangkar motor.



**Gambar 6. Hasil percobaan beban konstan
(a) Kecepatan motor dan (b) arus jangkar motor**

Kesuksesan pengendalian arus jangkar untuk mengatur kecepatan motor tidak terlepas dari performansi output kontroller arus jangkar dalam mengatur *dutycycle* PWM untuk modulasi IGBT DC *chopper*. Hal ini dapat dilihat dari gelombang PWM yang dihasilkan oleh pin PWM arduino mega 2560. Gambar 7(a) menunjukkan gelombang PWM yang dihasilkan oleh pin PWM arduino mega 2560 pada saat kecepatan motor 500 rpm yang diukur menggunakan osiloskop. Pada pengukuran ini, rentang tegangan osiloskop diset 5 Volt/Div dengan waktu 50 mikrodetik/Div. Dalam percobaan ini, PWM diset dengan frekuensi switching 7.8 kHz dengan prescaler 2 pada timer 2 arduino mega 2560. Gambar 7(a) menunjukkan bahwa tegangan maksimum PWM dari pin arduino adalah 5 Volt dengan *dutycycle* dibawah 50%. Hal ini sesuai dengan karakteristik output PWM arduino dan DC *chopper* satu kuadran, dimana tegangan output DC *chopper* berbanding lurus dengan *dutycycle* PWM. Pada percobaan ini, motor hanya dioperasikan dengan kecepatan di bawah 50% dari rating kecepatan motor, yakni 1400 rpm, sehingga *dutycycle* yang dihasilkan di bawah 50%. Hal ini dapat dilihat dari gelombang PWM, dimana waktu ON nya lebih kecil dari waktu OFF nya.

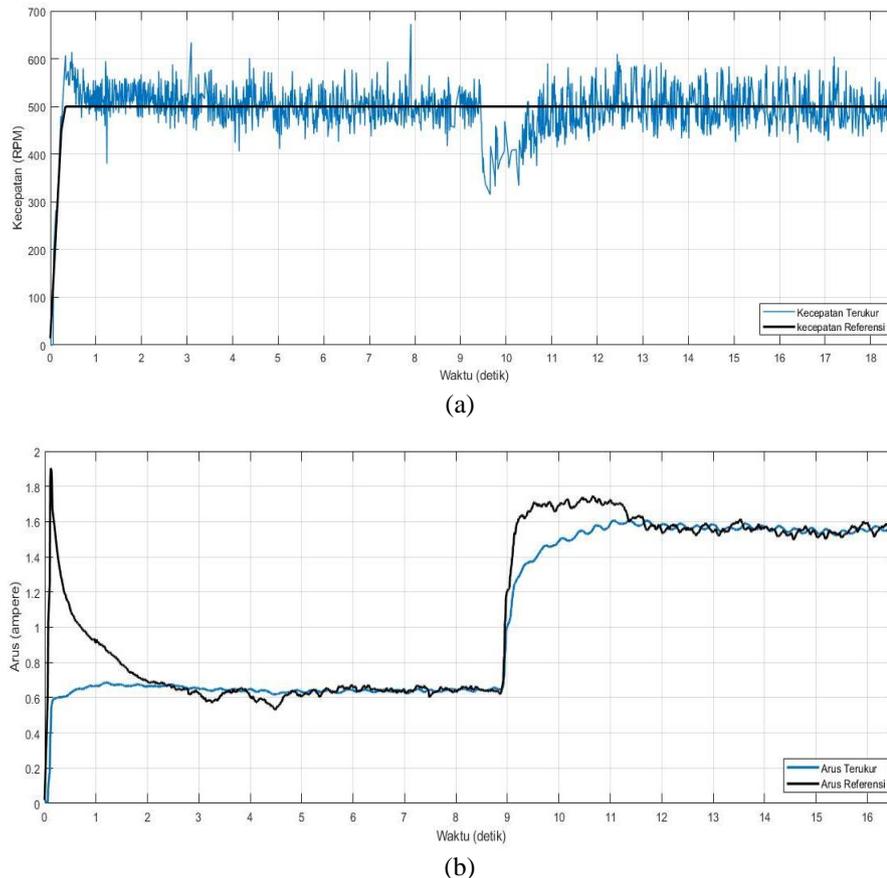


Gambar 7. Gelombang PWM
(a) Gelombang output pin PWM arduino dan (b) Gelombang output *gate driver*

Gambar 7(b) menunjukkan gelombang output PWM pada pin output *gate driver*. Hasil pengukuran dengan osiloskop ini menunjukkan bahwa tegangan output *gate driver* sudah sesuai dengan nilai tegangan untuk mengaktifkan switch IGBT, sehingga IGBT dapat beroperasi sesuai dengan sinyal modulasi PWM. Hal ini membuat arus jangkar motor dapat dikendalikan dengan dengan arus jangkar referensi yang dihasilkan oleh kontroller kecepatan. Integrasi dari semua ini membuat motor beroperasi sesuai dengan kecepatan referensi yang diinputkan dari keypad.

Pada percobaan kedua, sistem kendali kecepatan motor yang diusulkan dalam paper ini diuji dengan beban yang bervariasi. Variasi beban dilakukan dengan menghubungkan generator DC dengan resistor 1 Ampere. Pada percobaan ini, motor DC dioperasikan dengan kecepatan konstan 500 rpm, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8(a). Pada kondisi awal, beban resistor tidak dihubungkan dengan generator, sehingga beban motor hanyalah generator DC tanpa beban. Pada waktu percobaan 9 detik beban resistor dengan arus 1 Ampere dihubungkan dengan generator. Gambar 8(a) menunjukkan bahwa kecepatan motor tetap konstan pada kecepatan referensi 500 rpm walaupun beban divariasikan pada waktu percobaan 9 detik. Kecepatan motor mengalami perubahan dengan error maksimum 180 rpm pada waktu transien, yaitu saat beban resistor dihubungkan dengan generator, namun kecepatan motor tersebut kembali ke nilai referensi 500 rpm pada kondisi tunak dalam waktu

2 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali kecepatan motor DC yang diusulkan juga telah sukses mengendalikan kecepatan motor walaupun beban motor tersebut bervariasi. Jika kecepatan motor tidak dikendalikan, maka kecepatan motor akan turun ketika beban dinaikan. Namun hasil percobaan ini menunjukkan bahwa kecepatan motor tetap dapat dikendalikan sesuai referensi walaupun beban berubah-ubah.



**Gambar 8. Hasil percobaan beban bervariasi
(a) Kecepatan motor dan (b) arus jangkar motor**

Kesuksesan kendali kecepatan motor ini tidak terlepas dari kesuksesan controller arus jangkar dalam mengendalikan arus jangkar motor, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8(b), dimana arus jangkar motor dapat mengikuti arus jangkar referensi pada kondisi tunak, sehingga motor dapat beroperasi sesuai dengan kecepatan referensi.

PENUTUP

Sistem kendali kecepatan motor DC yang diusulkan menggunakan DC *chopper* satu kuadran berbasis controller PI yang diimplementasikan dengan arduino mega 2560 telah diuji dengan dua percobaan yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa system kendali kecepatan motor DC yang diusulkan telah sukses mengendalikan kecepatan motor sesuai dengan kecepatan referensi, walaupun kecepatan referensinya atau bebannya divariasikan. Hal ini menunjukkan bahwa system kendali kecepatan motor DC yang diusulkan memiliki performansi yang cukup bagus dalam mengendalikan kecepatan motor DC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chardian Arguta, Sulastri Rubiyanti, Eko Sulisty. *Kontrol Kecepatan Motor DC Dengan Kontrol PID Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535*. Bangka Belitung, 2017.
- [2] Yakob Liklikwatil, *Mesin-mesin Listrik untuk D3*. Yogyakarta: Deepublish, 2014.
- [3] Mihai Albu, *Lab no.18 One and Two Quadran Choppers*. Technical University of Iasi: Power Electronics Laboratory.
- [4] Cahya Ibrahim, Tejo Sukmadi, Agung Nugroho. *Perancangan Pengontrolan Motor DC Menggunakan DC-DC Konverter Class C Mode Motoring dan Regenerative Breaking Untuk Simulasi Kendaraan Listrik*. *Transient*, 5(3), 338-344, 2017.
- [5] Odinanto, Tjahja. dkk. *Perancangan Pengendali Kecepatan Motor Arus Searah 1 HP 220 Volt Dengan Metode PI Berbasis Mikrokontroler*. Surabaya, 2015.
- [6] Saputra, Iqbal Chan. *Pengaturan Kecepatan Motor Dc Berbasis Arduino*. Disertasi. Universitas Mataram, 2018.

Biodata Penulis

Muhamad Ilham Esario, lahir di Bukittinggi, 09 November 1996. Saat ini sedang menyelesaikan studi DIV Teknik Elektro Industri pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

Muldi Yuhendri, lahir di Agam, 13 Desember 1981. Menyelesaikan Sarjana Pendidikan Teknik Elektro di Universitas Negeri Padang tahun 2005 dan menyelesaikan program S2 Teknik Elektro di ITS Surabaya pada tahun 2009 serta S3 Ilmu Teknik Elektro pada tahun 2017 di kampus yang sama. Bekerja sebagai staf pengajar di jurusan teknik elektro FT UNP sejak tahun 2006 sampai sekarang.