

PERANCANGAN DAN PENGUJIAN AWAL KENDALI MOTOR DC BRUSHLESS UNTUK INDEPENDENT 4-WHEEL DRIVE PLATFORM ROBOT REV-11

DC BRUSHLESS MOTOR CONTROL DESIGN AND PRELIMINARY TESTING FOR INDEPENDENT 4-WHEEL DRIVE REV-11 ROBOTIC PLATFORM

Roni Permana Saputra, Rizqi Andry Ardiansyah, Midriem Mirdanies, Arif Santoso,
Aditya Sukma Nugraha, Anwar Muqorobin, Hendri Maja Saputra, Vita Susanti, Estiko Rijanto

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI
Komp. LIPI Bandung, Jl Sangkuriang, Gd 20, Lt 2, Bandung,
Jawa Barat 40135, Indonesia.
permana.saputra@yahoo.co.id

Diterima: 18 November 2011; Direvisi: 25 November 2011; Disetujui: 12 Desember 2011;
Terbit online: 22 Desember 2011.

Abstrak

Makalah ini membahas tentang desain sistem kendali motor DC brushless menggunakan microcontroller ATmega 16 untuk diimplementasikan pada independent 4-wheel drives pada platform Mobil Robot LIPI versi 2 (REV-11). Sistem kendali yang dibuat terdiri dari 2 bagian yaitu modul kendali motor DC brushless dan kendali supervisor yang berfungsi untuk mengoordinasi perintah ke modul-modul kendali motor. Untuk mengendalikan platform REV-11, kendali supervisory mengirimkan data referensi berupa kecepatan dan arah pada modul kendali motor sebagai referensi untuk mengendalikan kecepatan dan arah dari masing-masing aktuator pada platform REV-11. Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa sistem kendali yang didesain sudah mampu berfungsi dengan baik untuk mengkoordinasi dan mengendalikan kecepatan dan arah gerak motor aktuator platform REV-11.

Kata kunci: motor DC brushless, microcontroller, mobile robot, kontrol supervisory, kontrol gerak.

Abstract

This paper discusses the design of control system for brushless DC motor using microcontroller ATmega 16 that will be applied to an independent 4-wheel drive Mobile Robot LIPI version 2 (REV-11). The control system consists of two parts which are brushless DC motor control module and supervisory control module that coordinates the desired command to the motor control module. To control the REV-11 platform, supervisory control transmit the reference data of speed and direction of motor to control the speed and direction of each actuator on the platform REV-11. From the test results it is concluded that the designed control system work properly to coordinate and control the speed and direction of motion of the actuator motor REV-11 platform.

Keywords: brushless DC motor, microcontroller, mobile robot, supervisory control, motion control.

I. PENDAHULUAN

Robot merupakan contoh klasik produk mekatronik yang dikenal banyak orang pada umumnya. Mekatronik sendiri secara keseluruhan di Indonesia belum banyak dikenal. Untuk membuat suatu robot diperlukan berbagai bidang keilmuan yang meliputi teknik mesin, teknik elektro, teknik kendali, teknik komputer, teknik komunikasi, dan pengolahan citra [1]. Akhir-akhir ini telah banyak dilakukan penelitian di bidang robotika baik di level akademisi, mahasiswa, dan peneliti, termasuk negara kita Indonesia yang juga turut berperan dalam penelitian dan berinovasi dalam pembuatan robot [2]. Selain itu, banyak juga dilakukan kontes-kontes robot di level pelajar dan mahasiswa,

terutama yang lebih menekankan pada aspek algoritma kecerdasan buatan [2].

Sesuai dengan tugas dan fungsi pokok Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika (P2 Telimek), untuk meningkatkan kompetensi bidang mekatronik, P2 Telimek telah dan sedang melakukan penelitian dan pengembangan robotika, khususnya robot untuk aplikasi pertahanan dan keamanan. Pada tahun 2009 telah dihasilkan satu contoh produk mobil robot LIPI versi pertama (MRV-1) yang memiliki kemampuan menaiki tangga dan melewati tanggul. Robot ini mampu menaiki tangga dengan kemiringan 15° dan melewati tanggul setinggi 10 cm. robot ini memiliki dimensi 190 x 190 x 190 cm dan berat 190 kg. Dengan dimensi

yang besar ini, robot sulit bermanuver di ruang sempit dan karena bobotnya yang berat, MRV-1 sulit diangkat sehingga menghambat mobilitas. Platform MRV-1 memiliki *drive train mechanism* berupa mekanisme roda, *trase* dan *ramp*. Mekanisme ini digerakkan menggunakan motor DC. Sistem kendali yang diterapkan baru menggunakan kendali arus analog.

Pada tahun 2011, P2-Telimek melakukan kembali penelitian rancang bangun robotik hankam. Pada penelitian ini, dilakukan penyempurnaan desain mobil robot LIPI yang baru untuk menghasilkan contoh produk baru Mobil Robot LIPI versi kedua (REV-11). Perbedaan robot ini dengan versi sebelumnya terletak pada desain sistem mekanik *platformnya* yang berdimensi lebih kecil dan lebih ringan. Selain itu, sistem penggerak *platform* pada robot ini juga berbeda dengan versi sebelumnya yang menggunakan motor DC dengan kendali analog. Pada REV-11, sistem penggerak *platform* menggunakan 4 motor DC *brushless* dengan kendali digital. Penggunaan motor DC *brushless* memiliki keuntungan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan motor DC karena tidak menggunakan sikat sehingga tidak ada rugi gesekan. Selain itu motor DC *brushless* memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan *coil* yang terletak sebagai stator yang terpasang pada *body* sehingga proses pendinginan lebih baik [3].

Makalah ini membahas tentang desain dan pengujian sistem kendali motor DC *brushless* menggunakan *microcontroller* ATmega 16 untuk diimplementasikan pada *independent 4-Wheel*

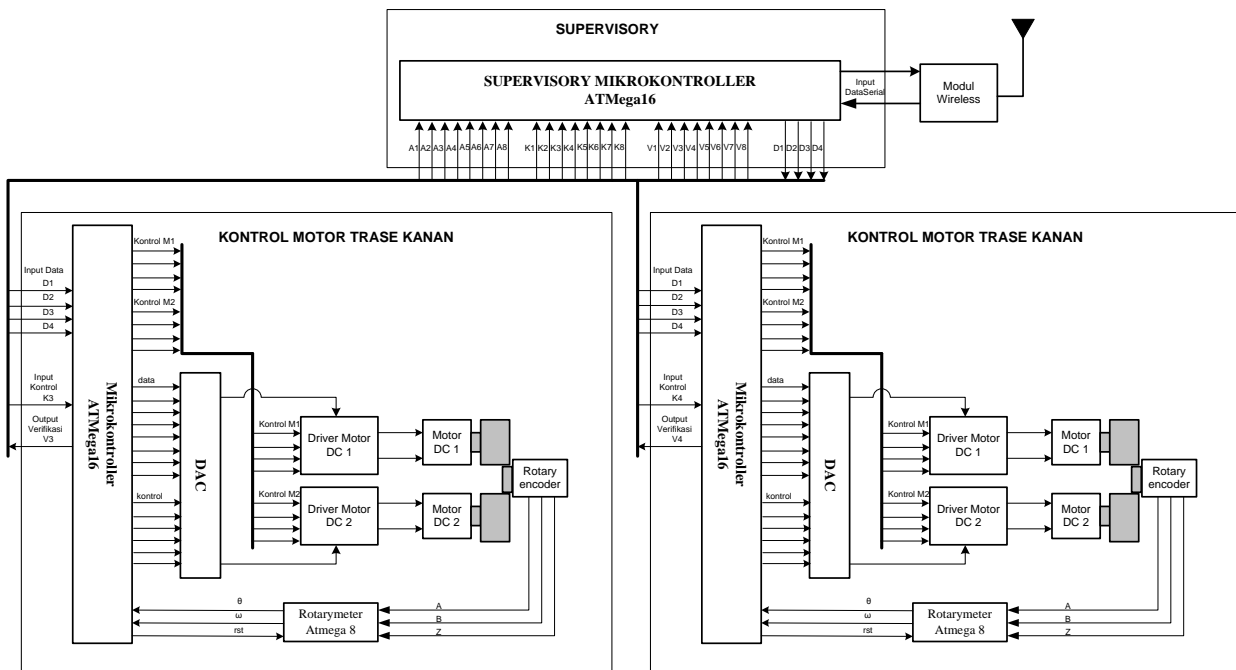
drive pada *platform* Mobil Robot LIPI versi 2 (REV-11).

II. PERANCANGAN SISTEM

Sistem ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras berupa sistem rangkaian elektronika dan rangkaian digital yang terintegrasi untuk melakukan pengendalian terhadap aktuator dari sistem penggerak REV-11. Dalam penelitian ini, aktuator yang dikendalikan berupa motor DC *brushless* produk Oriental Motor. Penggunaan motor DC *brushless* dilakukan dengan pertimbangan bahwa unit motor DC *brushless* memiliki fitur sebagai berikut [4] :

1. Memiliki efisiensi yang tinggi karena menggunakan rotor permanen magnet dan rugi-rugi sekunder yang kecil.
2. Inersia rotor dapat dikurangi, dan diperoleh respon kecepatan yang tinggi.
3. Karena efisiensinya tinggi memungkinkan mengurangi ukuran motor menjadi lebih kecil
4. Fluktuasi kecepatan akibat perubahan beban kecil.

Perangkat keras sistem pada penelitian ini terdiri dari rangkaian sistem *microcontroller*, *driver* motor DC *brushless*, dan modul *Digital to Analog Converter* (DAC). Adapun perangkat lunak berupa algoritma kendali pada *microcontroller* yang terdiri dari algoritma kendali *supervisor* dan algoritma kendali motor. Diagram blok dari sistem kendali digital ini ditunjukkan pada Gambar 1.



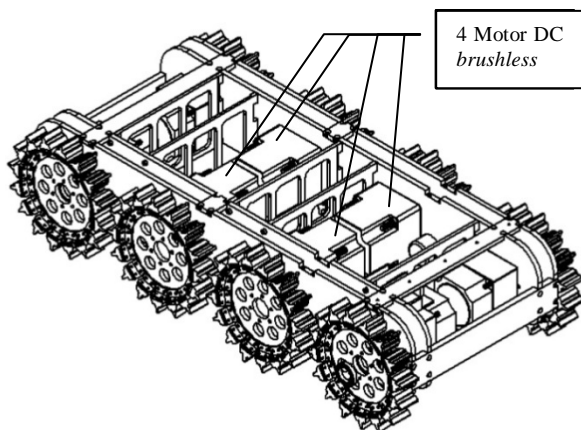
Gambar 1. Diagram blok sistem kendali platform REV-11.

Gambar 1 menunjukkan bagian kendali *supervisory* yang menerima data dari *wireless*, kemudian mengkoordinasikan kendali motor pada *wheel drive* kanan dan kiri dan mengirimkan data kecepatan serta arah putaran ke masing-masing kendali motor. Data dikirimkan pada *port* yang sama di bagian *supervisory* kendali dalam bentuk sinyal *pulse width modulation (PWM)* untuk semua modul kendali motor. Penerima data dibedakan dengan memberikan *port* penanda yang berbeda untuk masing-masing modul kendali motor.

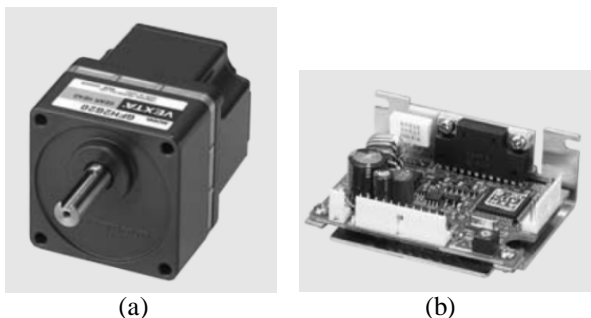
A. Perangkat Keras Sistem Pengendali

Perangkat keras sistem pengendali ini berupa *microcontroller* dan rangkaian elektronika digital yang terintegrasi untuk melakukan pengendalian aktuator. Aktuator yang dikendalikan berupa empat motor DC *brushless independent* yang masing-masing menggerakkan sistem roda *platform*. Pada Gambar 2, ditunjukkan konfigurasi motor DC *brushless* pada *platform REV-11*.

Aktuator yang digunakan pada sistem penggerak REV-11 berupa empat motor DC *brushless* produksi Oriental Motor. Pada Gambar 3 ditunjukkan motor DC *brushless* Oriental dan *driver* penggeraknya. Pengendalian motor ini dilakukan dengan mengendalikan konfigurasi pin



Gambar 2. Konfigurasi motor DC *brushless* pada sistem penggerak *Platform REV-11*.



Gambar 3. Aktuator *Platform Robot REV-11* [5]. (a) Motor DC *brushless*, (b) *Driver* penggerak motor.

input pada *driver* motor. Untuk mengatur kecepatan motor, dilakukan dengan memberikan *input* analog pada pin VRH dan mengkonfigurasi pin INT VR / EXT *Input* pada posisi EXT *input*.

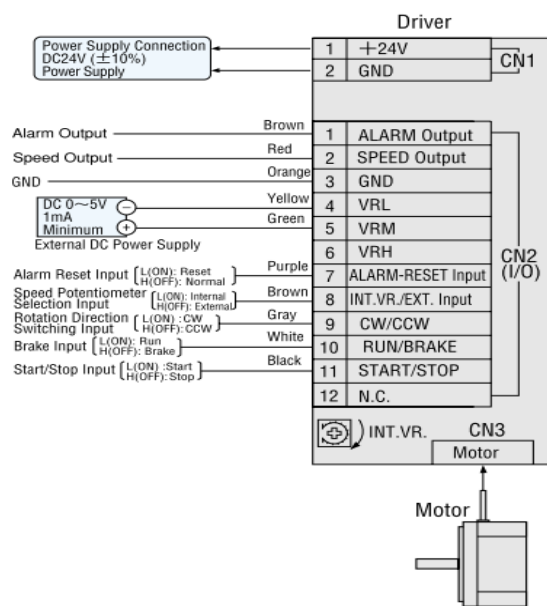
Pada Gambar 4 ditunjukkan Konfigurasi pin I/O pada *driver* penggerak motor DC *brushless* Oriental [6].

Perangkat keras sistem kendali digital yang dibuat berupa modul kendali motor dan satu buah modul kendali *supervisor*. Modul sistem kendali digital ini menggunakan *microcontroller* ATMega16 yang mampu menyimpan memori sebanyak 16 kByte dan memiliki 32 pin I/O [6][7][8]. Skema rangkaian modul sistem kendali yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 5 dan perangkat keras modul sistem kendali yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 6.

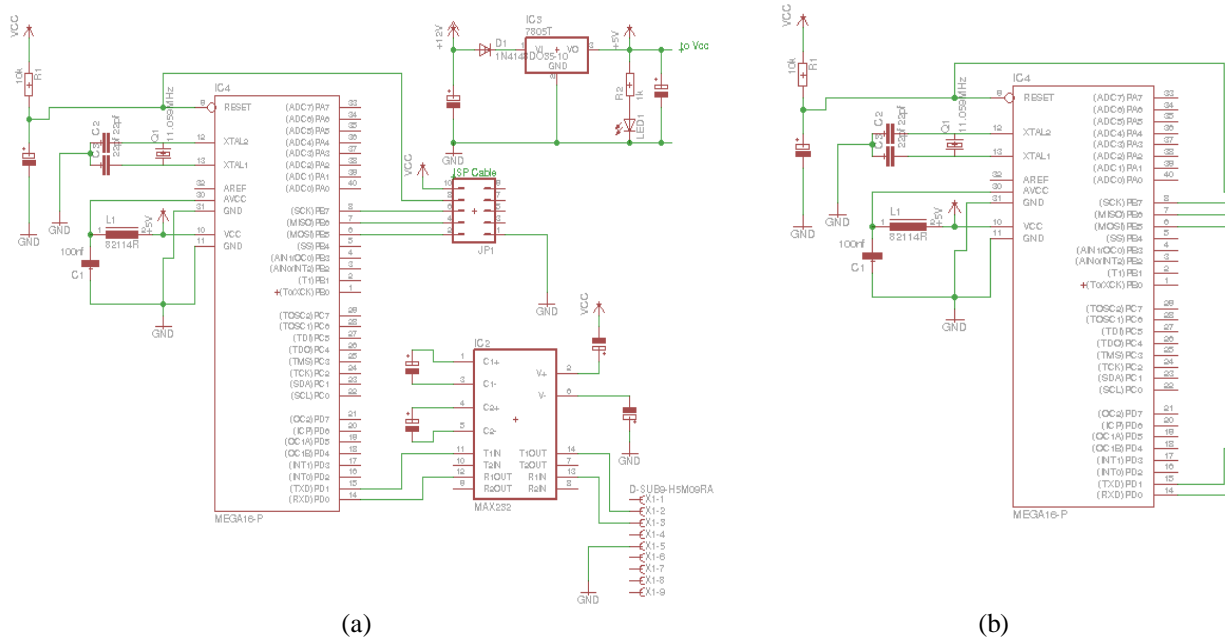
B. Algoritma Perangkat Lunak Sistem Kendali

Perangkat lunak sistem ini terdiri dari dua bagian, yaitu perangkat lunak di *microcontroller* sebagai *supervisor* dan sebagai sistem pengendali aktuator. Gambar 7 menunjukkan diagram alir perangkat lunak di *microcontroller* sebagai kendali *supervisor*.

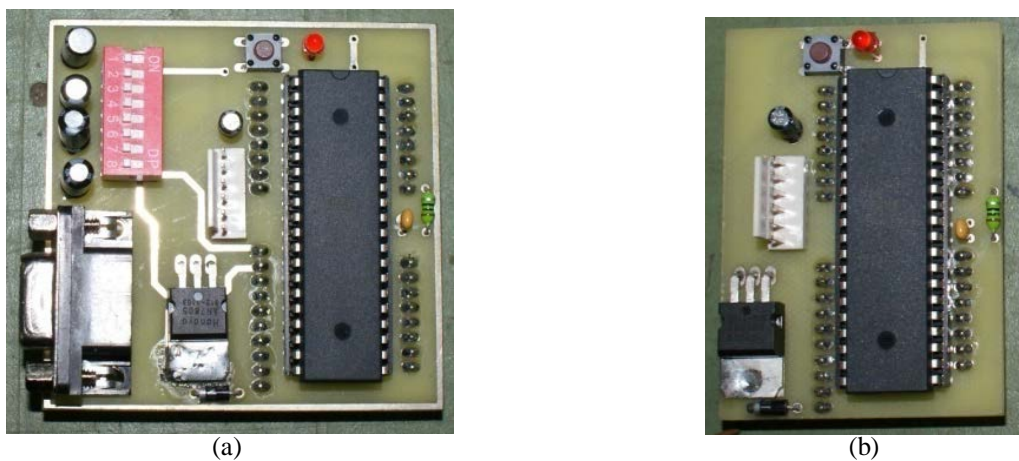
Microcontroller supervisor menerima data posisi dan kecepatan semua aktuator dari pengaturan operator melalui modul *wireless*. Data yang diterima akan dibagikan ke masing-masing modul kendali aktuator untuk dijadikan sebagai update data referensi masing-masing aktuator. Data referensi tersebut dikirimkan secara berkala ke semua modul kendali aktuator. Pengiriman data tersebut dilakukan dengan metode PWM. *Port* data yang digunakan untuk



Gambar 4. Konfigurasi pin I/O pada *driver* penggerak motor DC *brushless* Oriental [5].



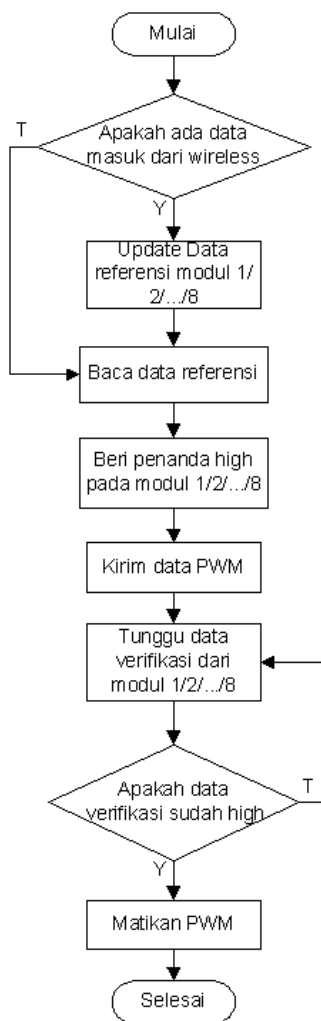
Gambar 5. Skema rangkaian elektronik kendali *supervisory*. (a) Rangkaian kendali *supervisory* (b) Rangkaian kendali digital motor DC *brushless*.



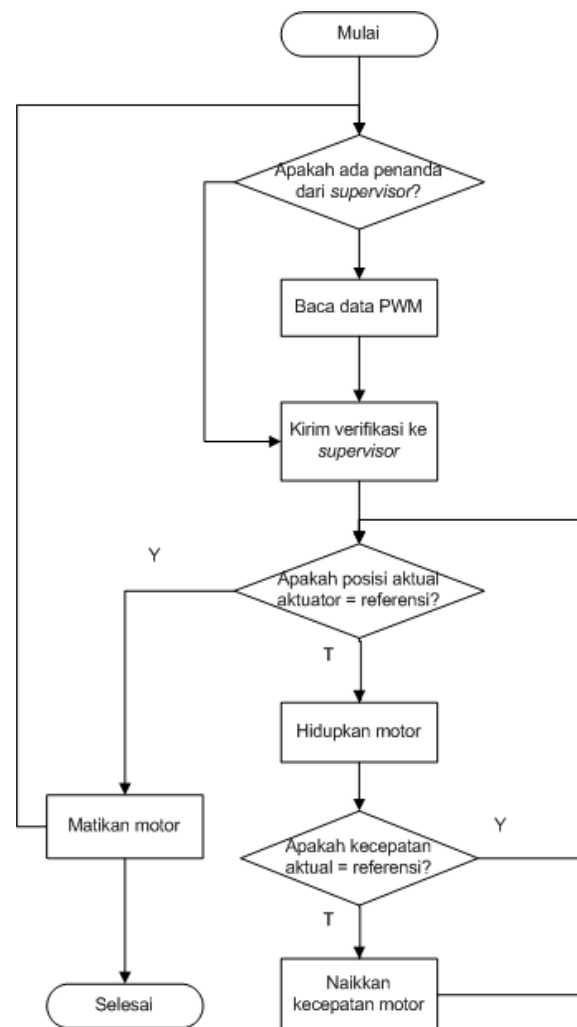
Gambar 6. Perangkat keras modul sistem kendali digital yang dibuat. (a) Rangkaian kendali *supervisory* (b) Rangkaian kendali digital motor DC *brushless*.

mengirimkan data PWM ke semua modul kendali menggunakan *port* yang sama. Pengiriman ke masing-masing modul kendali dilakukan secara bergantian dan berurutan pada frekuensi tinggi. Untuk membedakan peruntukan data pada masing-masing modul kendali digunakan *port* penanda yang berbeda pada masing-masing modul kendali. Jika *port* penanda suatu modul bernilai high, maka modul tersebut harus membaca data PWM yang dikirim modul *supervisor*. Selain *port* penanda, terdapat pula *port* verifikasi yang berbeda untuk masing-masing modul kendali yang digunakan untuk memberikan tanda pada modul *supervisor* bahwa modul kendali tersebut telah selesai membaca data yang dikirim modul *supervisor*.

Algoritma perangkat lunak di *microcontroller* sebagai modul kendali motor ditunjukkan pada Gambar 8. Pada modul kendali motor, *microcontroller* menerima data referensi dari modul *supervisor* berupa data PWM. Modul kendali akan membaca data PWM dari *supervisor* jika pin kendali pada modul tersebut bernilai high. Setelah modul kendali selesai membaca data PWM, modul kendali akan mengirimkan sinyal *acknowledgement* ke modul *supervisor* sebagai verifikasi. Data yang diterima dari *supervisor* digunakan untuk meng-*update* referensi sudut dan kecepatan aktuator yang dikendalikan. Jika data posisi aktual aktuator berbeda dengan nilai referensi, maka modul kendali akan mengatur run brake motor aktuator



Gambar 7. Algoritma perangkat lunak kendali di *microcontroller* sebagai kendali *supervisor*.



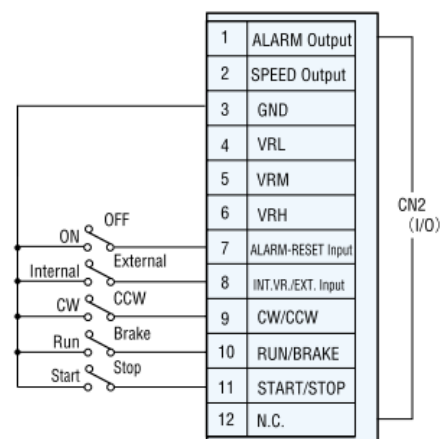
Gambar 8. Diagram alir perangkat lunak kendali di PC.

sampai posisi aktual aktuator sesuai dengan nilai referensi. Untuk mengendalikan kecepatan aktuator, modul kendali akan menaikkan atau menurunkan kecepatan sampai nilainya sama dengan nilai referensi kecepatan.

III. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian awal yang dilakukan pada sistem elektronik dan kendali ini meliputi uji fungsi pin *input* kendali pada *driver* motor, uji pembacaan sinyal umpan balik kecepatan dari motor, uji fungsi perangkat keras modul sistem kendali digital yang telah dibuat, pengujian fungsi kendali *supervisor*, dan pengujian fungsi kendali motor aktuator.

Uji coba fungsi pin *input* kendali pada *driver* motor DC dilakukan dengan mengkonfigurasi dan memberikan *input* pada pin kendali *driver* motor. Koneksi dan konfigurasi pada pengujian fungsi pin *input* kendali pada *driver* motor ditunjukkan pada Gambar 9. Proses pengujian fungsi pin *input* kendali pada *driver* motor



Gambar 9. Koneksi dan konfigurasi pada pengujian fungsi pin *input* kendali pada *driver* motor.

ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan pengujian semua pin *input* berfungsi dengan baik. Hasil pengujian I/O *driver* motor DC brushless ditunjukkan pada Tabel 1. Uji coba pembacaan sinyal umpan balik kecepatan motor, dilakukan dengan memberi *pull up* pada sinyal keluaran

umpan balik kecepatan motor, kemudian dibaca oleh *oscilloscope* dan ditampilkan di komputer. Koneksi dan konfigurasi pada pengujian fungsi pembacaan sinyal umpan balik kecepatan motor ditunjukkan pada Gambar 11.

Hasil pembacaan sinyal umpan balik kecepatan motor ditunjukkan pada Gambar 12. Selain menggunakan *oscilloscope*, pengujian sinyal umpan balik kecepatan motor juga dilakukan dengan mengukur secara analog

tegangan pada *output* umpan balik kecepatan motor dengan menggunakan multimeter. Untuk memvariasikan kecepatan motor, dilakukan dengan melakukan perubahan *input* analog secara berkala antara 0 sampai dengan 5 Volt pada pin VRM pada *driver* motor.

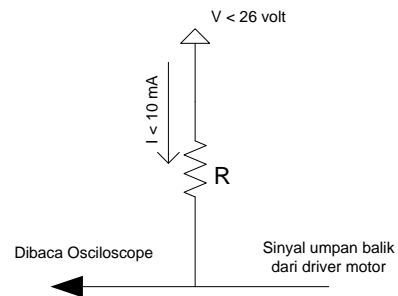
Hasil pengujian *output* umpan balik kecepatan motor DC *brushless* ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 13.

Tabel 1.
 Hasil pengujian pin I/O *driver* Oriental Motor DC *brushless*.

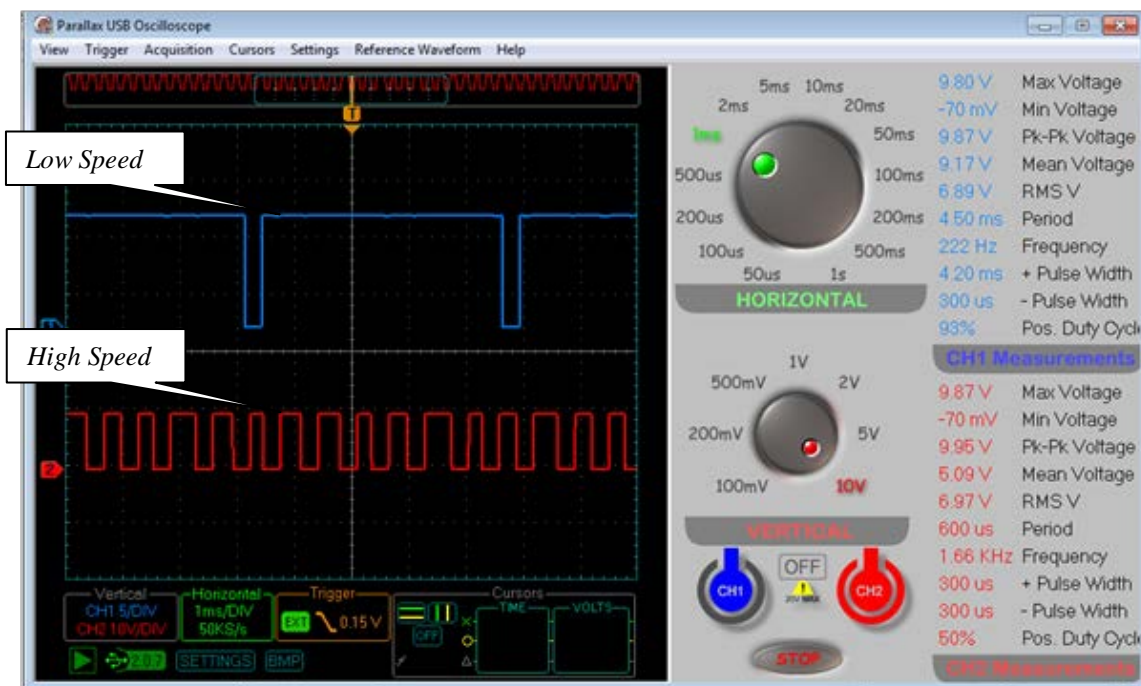
Nama Pin	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
Start/ Stop	On	On	On	Off
Run/ Brake	On	On	Off	On
CW/ CCW	On	Off	Off	Off
Hasil	Motor berputar searah jarum jam	Motor berputar berlawanan jarum jam	Motor berhenti seketika	Motor berhenti karena inersia



Gambar 10. Proses pengujian fungsi pin input kendali pada *driver* motor.



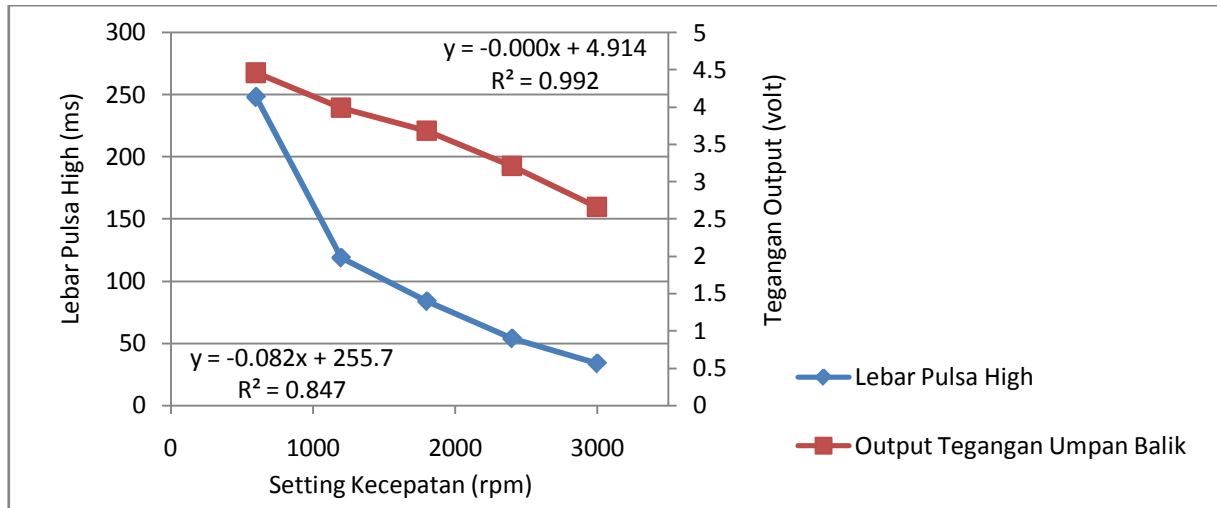
Gambar 11. Koneksi dan konfigurasi pada pengujian fungsi pembacaan sinyal umpan balik kecepatan motor.



Gambar 12. Hasil pembacaan sinyal umpan balik kecepatan motor menggunakan *oscilloscope*.

Tabel 2.
 Hasil pengujian output umpan balik kecepatan motor DC brushless.

Input analog (volt)	Lebar pulsa low (ms)	Lebar pulsa high (ms)	Tegangan output analog (volt)	Kecepatan motor (rpm)
1	30	248	4,46	600
2	30	119	3,99	1.200
3	30	84	3,68	1.800
4	30	54	3,21	2.400
5	30	34	2,66	3.000



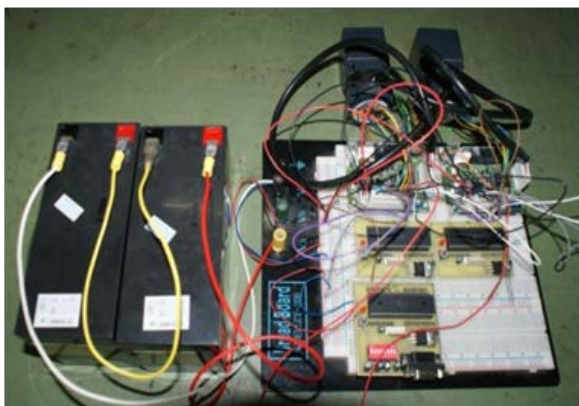
Gambar 13. Hasil pengujian output umpan balik kecepatan motor DC brushless.

Untuk mengetahui unjuk kerja fungsi modul kendali *supervisor* yang telah dibuat pada Gambar 6, pengujian fungsi kendali *supervisor* dilakukan dengan menghubungkan modul kendali *supervisor* dengan dua modul kendali aktuator untuk menguji fungsi koordinasi dan pengiriman data ke masing-masing modul kendali aktuator. Kemudian pada masing-masing modul kendali aktuator, data yang diterima dari modul *supervisor* ditampilkan untuk disesuaikan dengan input data yang dikirim modul *supervisor*. Pada Gambar 14 ditunjukkan proses pengujian fungsi kendali *supervisor*. Hasil pengujian distribusi data kendali *supervisor* ke modul kendali motor ditunjukkan pada Tabel 3. Dari

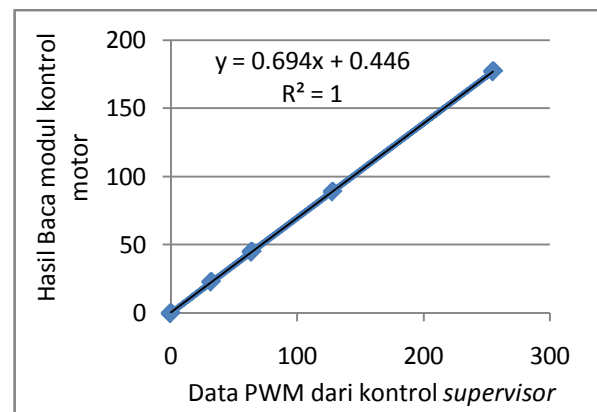
Tabel 3 dapat dilihat modul kendali aktuator hanya akan membaca dan meng-*update* data referensi dari modul *supervisor* jika pin kendali pada modul tersebut bernilai high. Berdasarkan hasil ini, modul *supervisor* sudah mampu untuk membagi dan mengkoordinasikan data ke masing-masing modul kendali aktuator.

Konversi pembacaan data yang dikirim oleh kendali *supervisor* pada modul kendali motor ditunjukkan pada Gambar 15. Gambar 15 menunjukkan konversi pembacaan data yang dikirim oleh modul kendali *supervisor* oleh modul kendali motor mengikuti persamaan (1):

$$d = 0,694x + 0,446 \quad (1)$$



Gambar 14. Pengujian Fungsi Kendali Supervisor.



Gambar 15. Konversi pembacaan data oleh modul kendali motor.

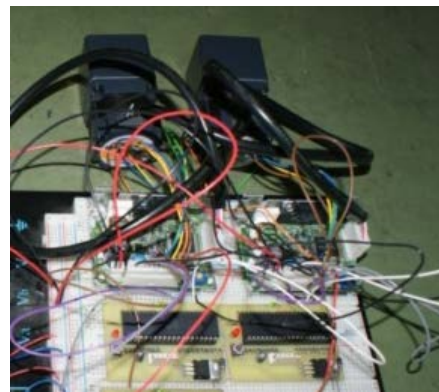
Tabel 3.
Hasil pengujian distribusi data kendali *supervisor* ke modul kendali motor.

Data PWM yang dikirim	Pin Kendali Modul 1	Pin Kendali Modul 2	Hasil Baca Modul 1	Hasil baca Modul 2
0	High	High	0	0
32	Low	Low	0	0
64	Low	High	0	45
128	Low	High	0	89
255	High	Low	177	89
0	Low	High	177	0
32	High	Low	23	0
64	High	High	45	45
128	low	low	45	45
255	High	Low	177	45

Pada persamaan (1), dengan nilai $R2 = 1$ dan nilai R menunjukkan bahwa linearitas pembacaan data oleh modul kendali motor dalam kondisi baik. Pengujian pengendalian I/O *driver* motor oleh modul kendali motor dilakukan dengan menghubungkannya pin *out* di *microcontroller* untuk mengendalikan gerakan motor dengan mode *cw/ccw*, *start/stop*, dan *run/brake* menggunakan *microcontroller*. Selain itu dilakukan pengujian fungsi kendali kecepatan dan kendali posisi motor berdasarkan *input* yang dimasukkan.

Proses pengujian fungsi perangkat keras modul sistem kendali digital motor ditunjukkan pada Gambar 16 dan hasil pengujian fungsi perangkat keras ditunjukkan pada Tabel 4. Berdasarkan tabel hasil pengujian, fungsi modul kendali aktuator untuk memberikan *input* kendali pada pin-pin kendali pada *driver* motor DC *brushless* dapat berfungsi dengan baik.

Response time sistem untuk variasi perubahan *setting* kecepatan ditunjukkan pada Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa variasi perubahan nilai *setting* kecepatan tidak berpengaruh signifikan terhadap *response time* dari sistem.



Gambar 16. Pengujian fungsi perangkat keras modul sistem kendali digital motor.

Tabel 4.
Hasil uji coba fungsi perangkat keras modul sistem kendali digital.

Nama Pin	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
Start/ Stop	Low	Low	Low	High
Run/ Brake	Low	Low	High	Low
CW/ CCW	Low	High	High	High
Hasil	Motor berputar searah jarum jam	Motor berputar berlawanan jarum jam	Motor berhenti seketika	Motor berhenti karena inersia

Tabel 5.
Response time sistem untuk variasi perubahan *setting* kecepatan.

Perubahan <i>setting</i> kecepatan Δv (volt)	<i>Response time</i> (ms)	Rata-rata <i>response time</i> (ms)
1 (51)	0,632	0,66
2 (102)	0,6	
3 (153)	0,72	
4 (204)	0,67	
5 (255)	0,692	

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, telah dihasilkan sistem pengendali digital motor DC *brushless* menggunakan *microcontroller* ATmega 16 untuk diaplikasikan pada aktuator *platform mobile robot* REV-11. Berdasarkan hasil pengujian awal dan analisis, fungsi *input* dan *output* pada *driver* motor sudah mampu untuk mengendalikan putaran motor DC *brushless* pada putaran 0 sampai dengan 3.000 rpm. Untuk pengujian sinyal umpan balik kecepatan motor menunjukkan lebar pulsa *low* pada sinyal umpan balik kecepatan tetap dengan lebar pulsa 30 ms. Sedangkan lebar pulsa *high* pada sinyal umpan balik kecepatan motor berubah mengikuti perubahan kecepatan motor. Berdasarkan hasil pengujian, pada kecepatan maksimum lebar pulsa *high* pada sinyal umpan balik kecepatan motor menunjukkan nilai 34 ms. Tegangan analog konversi pada sinyal umpan balik pada kecepatan maksimum bernilai 2,66 V.

Dari hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa perangkat keras dan algoritma kendali yang dibuat sudah menunjukkan unjuk kerja yang baik. Kendali *supervisory* mampu mendistribusikan data ke masing-masing kendali motor yang kemudian kendali motor mengeksekusi data yang diterima untuk mengendalikan kecepatan motor dengan *response time* rata-rata 0,66 ms. Dengan demikian dapat disimpulkan sistem kendali yang dibuat dapat bekerja dengan baik dan dapat diimplementasikan untuk mengendalikan aktuator pada sistem *platform mobile robot* REV-11.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Bidang Mekatronik serta teman-teman di Bidang Mekatronik yang telah membantu dalam penelitian ini. Selain itu penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) atas kesempatan yang diberikan melalui dana tematik sehingga penelitian robot REV-11 dapat berjalan dengan lancar. Penulis juga berterima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah membantu penulisan karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Estiko Rijanto. (2005) *Apa itu Mekatronika?*. [Online]. Available: <http://www.telimek.lipi.go.id/> [Dikutip: 15 September 2011]
- [2] Balza Achmad, "Simulator lengan robot enam derajat kebebasan menggunakan opengl," *TELKOMNIKA*, Volume 6, Nomor 3, pp. 209-216, 2008.
- [3] Atef Saleh, "Proportional Integral and Derivative Control of Brushless DC Motor," *European Journal of Scientific Research*, Volume 35, Nomor 2, pp. 198-203, 2009.
- [4] Kazuya Shirahata. *Speed Control Methods of Various Types of Speed Control Motors*. [Online]. Available: http://www.orientalmotor.com/technology/articles/pdfs/USA_RENGA_No166_1E.pdf [Dikutip: 15 September 2011]
- [5] Oriental Motor. (2011) *Brushless DC motor system AXH series*. [Online]. Available: <http://site.motadistribution.com/Brochures/orientalmotor/SpdAxx.pdf> [Dikutip: 15 September 2011]
- [6] Dian Anggraini. (2010) *Aplikasi Mikrokontroler atmega16 sebagai pengontrol sistem emergency dan lampu jalan yang dilengkapi dengan sensor cahaya (ldr) pada miniatur kompleks perumahan modern*. [Online]. Available: http://eprints.undip.ac.id/20728/1/MAKALA_H_TA_DIAN.pdf [Dikutip: 15 September 2011]
- [7] Mokh. Sholihul Hadi. (2008) *mengenal mikrokontroler AVR ATmega16*. [Online]. Available: <http://ilmukomputer.org/wp-content/uploads/2008/08/sholihul-atmega16.pdf> [Dikutip: 15 September 2011.]
- [8] X. Xiao, Y. Li, M. Zhang, and M. Li, "A novel control strategy for brushless DC motor drive with low torque ripples," in *Proceeding of 31st Annual Conference of IEEE: Industrial Electronics Society (IECON)*, 2005, pp. 1660-1664.
- [9] J. Puranen, *Induction Motor Versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications*. Lappeenranta: University of Technology, Lappeenranta, 2006.
- [10] S. Ruangsinchaiwanich, Z.Q. Zhu, and D. Howe, "Influence of magnet shape on cogging torque and back-emf waveform in permanent magnet machines,," in *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2005, pp. 284-289.
- [11] Microchip Technology, "Brushless DC (BLDC) motor fundamentals", Application note, AN885, 2003. [Online]. Available: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)

-)%20Motor%20Fundamentals.pdf [Dikutip: 15 September 2011]
- [12] Kazuo Abe, "Low-noise drive technology of Brushless motor," *RENGA*, vol. 163, pp. 19-25, 2003.
- [13] Texas Instrument. (2008) Brushless Dc Motor Controller. [Online]. Available: www.ti.com/lit/ds/symlink/uc2625-ep.pdf [Dikutip: 15 September 2011]
- [14] ATMEL. (2008) *AVR194: Brushless DC Motor Control using ATmega32M1*. [Online]. Available: http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8138.pdf [Dikutip: 15 September 2011]
- [15] ATMEL. (2010) *8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash (ATmega16, ATmega16L)*. [Online]. Available: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/2466s.pdf [Dikutip: 15 September 2011]