

# Sistem Karakterisasi dan Perencanaan Pengendali PID sebagai Kontrol Kecepatan Motor *Brushless* DC untuk Kursi Roda *Tricycle*

Dzikrur Rohmani Zuhkrufur Rifqi Muwafiqul Hilmi<sup>1</sup>, Achmad Arifin<sup>1</sup>, dan Andhika Estiyono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Biomedik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

<sup>2</sup>Departemen Desain Produk Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* andhikae@prodes.its.ac.id

**Abstrak**—Kursi roda merupakan salah satu alat bantu yang paling sering digunakan penyandang disabilitas untuk meningkatkan mobilitas pribadi mereka. Seiring berkembangnya teknologi, inovasi kursi roda mulai bermunculan. Seperti kursi roda yang dikombinasikan dengan *tricycle*. Karena ditujukan untuk penggunaan jarak menengah hingga jarak jauh, inovasi ini memerlukan kecepatan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, motor *brushless* DC (BLDC) hadir sebagai pengganti motor DC konvensional yang selama ini telah banyak diimplementasikan karena memiliki karakteristik torsi yang lebih baik, respons dinamis tinggi, efisiensi tinggi, umur operasi yang panjang, rentang kecepatan tinggi, serta biaya perawatan rendah. Kendati demikian, motor *brushless* DC memiliki kekurangan pada mekanisme pengendaliannya yang cukup sulit dan rumit karena tidak memiliki *brush* (sikat) yang menunjang proses komutasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dirancang sebuah instrumen yang dapat digunakan untuk karakterisasi motor *brushless* DC sekaligus perancangan dan implementasi pengendali PID sebagai kontrol kecepatan kursi roda *tricycle* untuk memenuhi kebutuhan tingkat keamanan yang tinggi pada teknologi asistif tersebut. Dari penelitian yang dilaksanakan, instrumen yang dirancang berhasil digunakan untuk melakukan pengambilan data. Selain itu, instrumen melakukan karakterisasi terhadap motor listrik *brushless* DC dari kursi roda *tricycle* yang diteliti dengan baik. Lebih lanjut, pengendali PID yang dirancang berdasarkan data yang diperoleh saat karakterisasi dapat dijalankan oleh instrumen. Dari percobaan didapatkan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang terbaik adalah 0,2, 0,00012, dan 0,0035 dibandingkan parameter yang lain dengan RMSE dari hasil *step response* sebesar 294,09. Setelah diimplementasikan, pengendali PID yang dirancang mampu mengendalikan kecepatan motor. Meskipun memiliki performa yang kurang baik, nilai aktual yang dibaca oleh sensor ditunjukkan perlahan-lahan mendekati nilai referensi yang diberikan.

**Kata Kunci**—Kursi Roda, Motor *Brushless* DC, Pengendali PID, *Tricycle*.

## I. PENDAHULUAN

KURSI roda merupakan salah satu alat bantu yang paling sering digunakan penyandang disabilitas untuk meningkatkan mobilitas mereka. Kursi roda juga telah menjadi kebutuhan mereka agar dapat menikmati hak asasi sebagai manusia, mendapatkan hidup yang bermartabat, serta mampu menjadi bagian dari masyarakat yang lebih produktif [1]. World Health Organization (WHO) memperkirakan, ada lebih dari 70 juta orang di seluruh dunia membutuhkan kursi roda, yang mana hanya 5-15% di antaranya yang memiliki akses untuk mendapatkan kursi roda tersebut [2]. Kebutuhan

akan kursi roda diperkirakan akan terus mengalami peningkatan. Hal tersebut lantaran jumlah penduduk lanjut usia (di atas 60 tahun) diperkirakan akan terus mengalami peningkatan selama beberapa dekade mendatang khususnya di negara berkembang [3] dan meningkatnya prevalensi cedera yang diakibatkan oleh kecelakaan lalu lintas, kekerasan, jatuh, perang dan bencana alam [5]–[7]. Oleh karena itu, sangat penting memastikan bahwa cukup banyak kursi roda yang dapat disediakan.

Seiring berkembangnya teknologi, penelitian yang berkaitan dengan peningkatan kualitas teknologi asistif tersebut melahirkan inovasi kursi roda yang dikombinasikan dengan *tricycle* [8]–[13]. Inovasi tersebut hadir karena kebutuhan mobilitas jarak menengah hingga jarak jauh pengguna kursi roda konvensional dengan roda berjumlah empat tidak dapat terpenuhi [13]. Karena kebutuhan tersebut, inovasi jenis ini memerlukan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan kursi roda dengan roda berjumlah empat pada umumnya. Oleh karena itu, motor *brushless* DC (BLDC) hadir sebagai pengganti motor DC konvensional yang selama ini telah banyak diimplementasikan pada kursi roda elektrik [14] karena memiliki kelebihan berupa karakteristik torsi yang lebih baik, respons dinamis tinggi, efisiensi tinggi, umur operasi yang panjang, rentang kecepatan tinggi, serta biaya perawatan rendah [15].

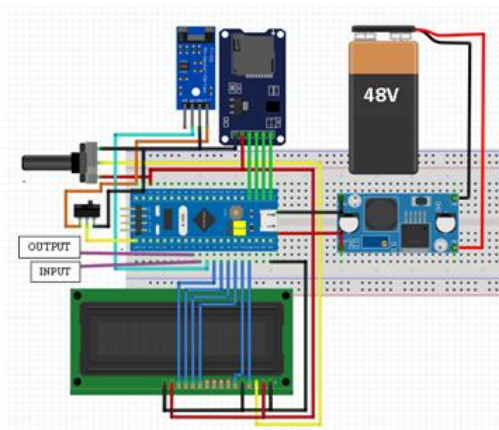
Kendati demikian, meski memiliki banyak keunggulan jika dibandingkan dengan motor DC konvensional, motor *Brushless* DC memiliki kekurangan pada mekanisme pengendaliannya yang cukup sulit dan rumit karena tidak memiliki *brush* (sikat) yang menunjang proses komutasi [16]. Untuk mengembangkan sistem kontrol yang memungkinkan kursi roda dapat beroperasi dengan mulus dan stabil, kecepatan menjadi variabel kontrol yang paling umum [17]. Beberapa tahun terakhir, berbagai solusi kontrol modern diusulkan untuk desain kontrol kecepatan motor BLDC [18]. Namun, sistem pengendalian menggunakan algoritma PID masih menjadi yang cukup sering digunakan karena sederhana, stabil, penyesuaian mudah, dan keandalan tinggi [19].

Berdasarkan hal tersebut, peneliti bermaksud merancang sistem yang dapat digunakan untuk karakterisasi sekaligus perancangan dan implementasi pengendali PID sebagai kontrol kecepatan motor *Brushless* DC pada kondisi tanpa beban untuk nantinya diimplementasikan pada kursi roda *tricycle* sebagaimana kebutuhan tingkat keamanan yang tinggi pada teknologi asistif.





Gambar 7. Diagram alir proses pembuatan instrumen pengambilan data.



Gambar 8. Wiring diagram dari instrumen yang dibuat.

fungsi yang lebih baik dari skema, pengendali PID memerlukan input dan peningkatan *membership function* [22]. Pada saat yang sama, satu set nilai diterapkan untuk koefisien konstanta pengendali PID yang mana ialah  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ .

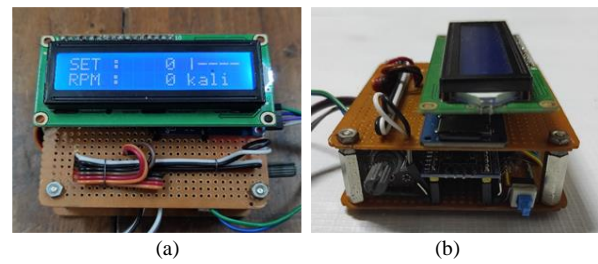
Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk menunjukkan respons dinamis terhadap hasil penyetelan cepat dari pengendali PID termodifikasi yang diusulkan yang dapat membantu mengontrol kecepatan motor dan mempertahankan kecepatan konstan selama perubahan beban. Dengan demikian, regulator PID dapat meningkatkan kinerja motor *Brushless DC* secara keseluruhan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fungsi kontroler PID dapat diberikan dengan kinerja kontrol yang lebih baik [23].

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Objek Penelitian

Objek penelitian yang akan digunakan pada pengerjaan mata kuliah Tugas Akhir kali ini secara umum adalah komponen dari kursi roda *tricycle* yang telah dikembangkan untuk tujuan penelitian di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Tim peneliti yang telah mengembangkan alat bantu mobilitas tersebut antara lain adalah Dr. Achmad Arifin S.T., M.Eng. dan Andhika Estiyono, S.T., M.T. yang masing-masing berasal dari Departemen Teknik Biomedik dan Departemen Desain Produk Industri.

Kursi roda *tricycle* tersebut memiliki 3 roda yang terdiri



Gambar 9. Tampak atas (a) serta tampak samping (b) dari instrumen yang digunakan pada penelitian ini.

SET	RPM	PID
0	240	1505
0	200	1505
0	240	1505
0	220	1505
0	240	1505
5	240	1505
27	220	1505
72	240	1505
218	200	1505
496	200	1507
642	220	1548
647	320	1596
648	460	1624
638	540	1640
624	600	1645
753	500	1663
757	620	1682
760	680	1693
868	720	1699

Gambar 10. Hasil percobaan dari pengujian instrumen yang terdapat pada *micro SD card*.

dari satu roda depan dan dua roda belakang. Kursi roda *tricycle* tersebut digerakkan oleh motor listrik *Brushless DC* yang ditenagai 4 baterai yang masing-masing memiliki kapasitas sebesar 12 Volt (V) dan dengan 25 Ampere hour (Ah). Saat ini kursi roda *tricycle* tersebut sedang dalam tahap penyempurnaan menuju desain yang direncanakan. Perkembangan terakhir dari proses pengerjaan kursi roda *tricycle* tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.

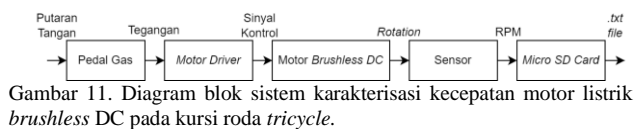
Lebih lanjut komponen penting dari kursi roda *tricycle* tersebut yang kemudian akan dijadikan sebagai objek penelitian pada pelaksanaan Tugas Akhir kali ini adalah motor listrik *Brushless DC* serta *motor driver* produksi brand Yalu, dan baterai SOLANA 6-DZF-20, yang secara berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.

#### B. Perancangan Perangkat Keras

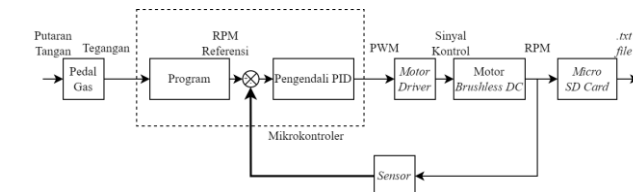
Agar dapat berjalan, sistem karakterisasi motor listrik kursi roda *tricycle* membutuhkan sebuah instrumen pengukur RPM. Instrumen tersebut akan digunakan untuk menghitung kecepatan yang dihasilkan oleh motor *Brushless DC* yang digunakan. Instrumen tersebut sekaligus akan digunakan sebagai sarana implementasi pengendali PID dalam mengendalikan kecepatan motor listrik *Brushless DC* yang rencananya akan digunakan sebagai penggerak kursi roda *tricycle*.

Proses pembuatan instrumen tersebut mengikuti diagram alir yang terdapat pada Gambar 7. Sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir, proses pembuatan dimulai dengan perencanaan yang meliputi memperkirakan fungsi-fungsi yang dibutuhkan agar sistem mampu melaksanakan tugasnya. Selain itu, pada proses ini juga dilakukan pemilihan komponen-komponen yang diperlukan agar fungsi-fungsi yang dibutuhkan oleh sistem dapat dilakukan.

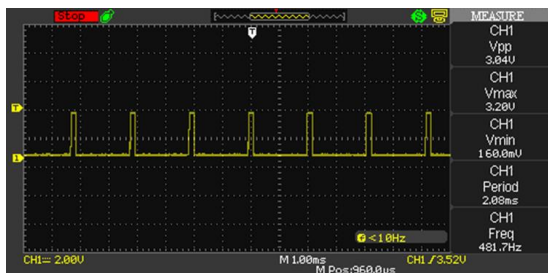
Dari perencanaan yang telah dilakukan, proses pengerjaan instrumen membutuhkan beberapa komponen, di antaranya STM32F103C8T6 *bluepill*, XL7015 DC to DC Converter *Step-down Module*, *MicroSD Card Module*, Sensor *optocoupler* FC-03, LDC, dan beberapa komponen tambahan lain.



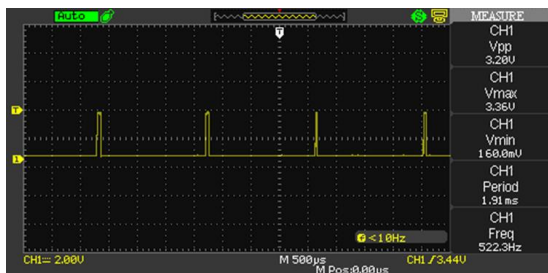
Gambar 11. Diagram blok sistem karakterisasi kecepatan motor listrik brushless DC pada kursi roda tricycle.



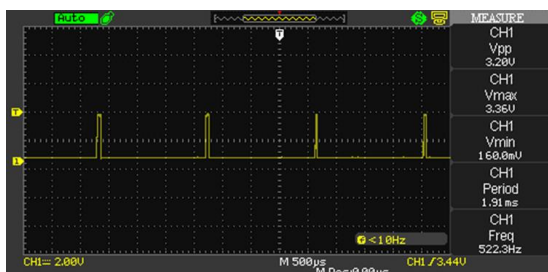
Gambar 12. Diagram blok sistem pengendalian kecepatan motor listrik brushless DC pada kursi roda tricycle.



Gambar 13. Sinyal keluaran sensor FC-03 saat melakukan pembacaan encoder disk dengan lubang berjumlah 6.



Gambar 14. Sinyal keluaran sensor FC-03 saat melakukan pembacaan encoder disk dengan lubang berjumlah 10.

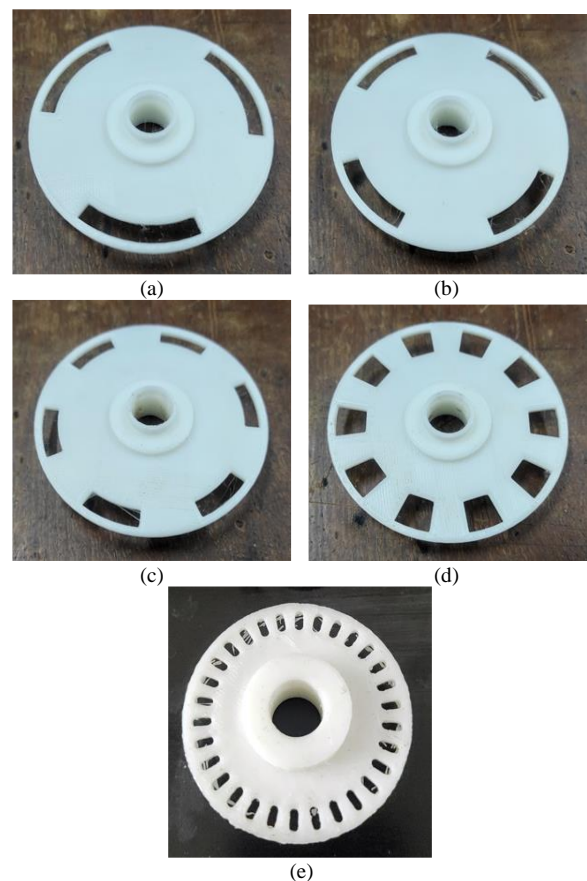


Gambar 15. Sinyal keluaran sensor FC-03 saat melakukan pembacaan encoder disk dengan lubang berjumlah 30.

Setelah komponen-komponen tersebut siap, kemudian komponen akan dirangkai seperti pada *wiring diagram* yang ditunjukkan pada Gambar 8 sehingga dapat membentuk sebuah sistem yang mampu melakukan karakterisasi dari motor listrik Brushless DC dari kursi roda tricycle dan mampu mengimplementasikan pengendalian kecepatan motor listrik Brushless DC dari kursi roda tricycle menggunakan pengendali PID.

Setelah instrumen selesai dibuat seperti yang direncanakan pada *wiring diagram*, akan dilakukan pemrograman menggunakan bahasa pemrograman C pada STM32Cube IDE hingga instrumen bekerja seperti yang direncanakan.

Untuk melaksanakan tugasnya dalam menghitung jumlah putaran dari motor brushless DC, instrumen membutuhkan *encoder* dan beberapa *part* tambahan. *Encoder* berfungsi menerjemahkan putaran dari motor hingga mikrokontroler dapat menghitung putaran aktual yang dilakukan oleh motor.



Gambar 16. Hasil cetak dari encoder dengan lubang berjumlah 3 (a), 4 (b), 6 (c), 10 (d), dan 30 (e).

*Encoder* yang digunakan pada penelitian ini dibuat menggunakan mesin cetak 3 dimensi (*3D printer*) Creality CR-10 Max yang merupakan properti milik Laboratorium Elektronika Medika Ruang B-205, Departemen Teknik Biomedik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Pembuatan *encoder* dan *part* tambahan akan mengikuti prosedur pada diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

C. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak berfokus pada pemrograman mikrokontroler STM32F103C8T6 *bluepill* menggunakan STM32Cube IDE. Mikrokontroler tersebut dipilih karena dapat melakukan beberapa pekerjaan dalam satu waktu atau *multithreading* yang mana akan sangat berguna saat proses pengambilan data dan pengendalian kecepatan dilakukan secara bersamaan. Mikrokontroler diprogram untuk melakukan beberapa fungsi seperti akuisisi data, pembacaan sinyal analog yang dihasilkan oleh pedal gas menggunakan metode ADC (*analog to digital converter*), menampilkan data melalui LCD, serta menyimpan data di *micro SD card*,

Untuk membuat mikrokontroler melakukan tugas tersebut perlu dilakukan pengaturan *pin* dan periferal pada STM32CubeMX terlebih dahulu. Pengaturan *pin* dan periferal ditunjukkan pada Gambar 3.

D. Diagram Blok Sistem

Diagram blok karakterisasi motor listrik untuk perancangan pengendali PID dan implementasi pengendali PID sebagai kontrol kecepatan motor listrik Brushless DC pada kursi roda tricycle secara berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 11 dan Gambar 12.

Tabel 1.  
Data yang dihasilkan pada pengujian baterai kursi roda *tricycle*

Trial	Waktu (menit)	Ah			Wh			Ap	Vm	V			Km ketika GPS terhubung (Km)
		Awal	Akhir	Selisih	Awal	Akhir	Selisih			Awal	Akhir	Selisih	
I	19	0	1,954	1,954	0	98,1	98,1	31,05	47,72	55,18	51,99	3,19	5,367
II	6	1,954	2,386	0,432	98,1	119,1	21	31,3	47,55	51,99	52,14	-0,15	0,806
III	15	0	2,963	2,963	0	142,6	142,6	31,25	46,99	52,30	51,22	1,08	5,938
IV	18	2,963	5,427	2,464	142,6	262,4	119,8	31,25	46,55	51,22	50,50	0,72	6,474
V	27	5,427	8,338	2,911	262,4	400	137,6	31,25	45,70	50,50	49,59	0,91	3,828
VI	35	8,338	10,78	2,45	400	515,33	115,33	31,25	44,86	49,85	48,90	0,95	6,755
Total	120	18,68	31,86	13,17	903,10	1537,5	634,43	187,35	279,37	311,04	304,34	6,70	29,17
Rata-rata	20	3,113	5,309	2,195	150,51	256,25	105,73	31,225	46,561	51,84	50,723	1,1166	4,8613

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Instrumen Pengambilan Data

Setelah melalui proses pengerjaan, instrumen yang digunakan pada penelitian ini selesai dibuat. Hasil pengerjaan instrumen tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Untuk memastikan instrumen dapat menjalankan fungsi pengambilan data sesuai rencana, dilakukanlah pengambilan data tegangan hasil perputaran pedal gas serta perhitungan RPM yang dihasilkan. Setelah pengujian dilakukan, diketahui bahwa instrumen menghasilkan data yang sesuai dengan yang diperintahkan oleh program. Hal tersebut terlihat dari data pada Gambar 10 yang dihasilkan oleh percobaan.

Selain itu, pada tahap pengujian instrumen ini, dilakukan pengujian secara lebih khusus pada sensor yang digunakan yang dalam hal ini sensor FC-03. Dari pengujian tersebut dihasilkan data berupa sinyal keluaran sensor yang dibaca menggunakan osiloskop. Sinyal yang dihasilkan untuk percobaan tersebut secara berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 13, 14, dan 15. Selain dibaca menggunakan osiloskop, nilai RPM aktual dari motor juga dihitung menggunakan instrumen yang dibuat sekaligus menggunakan *Tachometer Digital DT-2234C+*. Dari tiga kali percobaan menggunakan *encoder disk* dengan lubang 6, 10, dan 30 secara berturut-turut dihasilkan nilai sekitar 4810, 3100, dan 1120 untuk perhitungan instrumen dan dihasilkan pembacaan sekitar 4800, 3129, dan 1100 untuk pembacaan menggunakan *Tachometer Digital*.

B. Pengujian Encoder Hasil Desain 3 Dimensi

Setelah melalui proses pengerjaan, *encoder* yang telah dirancang menggunakan *software* desain 3 dimensi selesai dibuat. Hasil cetak dari *encoder* untuk setiap jumlah lubang mulai dari 3, 4, 6, 10, dan 30 ditunjukkan oleh Gambar 16.

Agar sistem yang dirancang menghasilkan data yang akurat, pengujian berupa pengambilan data menggunakan *encoder* yang telah dicetak dilakukan. Berdasarkan percobaan yang dilakukan, dihasilkan data berupa input tegangan serta RPM motor *Brushless DC* untuk masing-masing *encoder*. Hasil percobaan tersebut kemudian diolah menjadi grafik sebagaimana ditunjukkan pada **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., 19, dan 20.**

Pada grafik yang ditunjukkan tampak ada perbedaan hasil untuk beberapa lubang. Pada hasil pembacaan *encoder* dengan lubang 3, 4, dan 6 menunjukkan hasil yang relatif sama. Sedangkan, perbedaan pembacaan terjadi cukup signifikan pada data yang diambil menggunakan *encoder* dengan lubang berjumlah 10 dan 30. Pada data tersebut terdapat penurunan hasil pembacaan untuk nilai RPM hingga

0 ketika berada pada tegangan tertentu. Untuk hasil pembacaan yang menggunakan *encoder* dengan lubang berjumlah 10, pembacaan maksimum terjadi ketika tegangan berada pada kisaran 2.1 V dengan pembacaan RPM sekitar 2850. Dan untuk hasil pembacaan yang menggunakan *encoder* dengan lubang berjumlah 30, terjadi penurunan ketika tegangan berada pada kisaran 1.5 V dengan pembacaan RPM sekitar 1100.

Perbedaan pembacaan tersebut kemungkinan terjadi karena sensor FC-03 yang digunakan tidak mampu membaca putaran *encoder* dengan lubang 10 dan 30 karena periode perpindahan antara lubang terjadi sangat cepat dan melebihi kemampuan pembacaan dari sensor.

Berdasarkan hal tersebut, pada tahap implementasi diputuskan bahwa akan digunakan *encoder* dengan lubang berjumlah 6 sebagai acuan karena jumlah tersebut merupakan jumlah terbanyak dari lubang *encoder* yang menghasilkan pembacaan sesuai.

C. Karakterisasi Motor Brushless DC

Proses karakterisasi motor *Brushless DC* dari kursi roda *tricycle* dilakukan dengan melakukan percobaan berupa pengambilan data perubahan RPM untuk setiap perubahan tegangan. Data yang dihasilkan dari percobaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 17 dan Gambar 18.

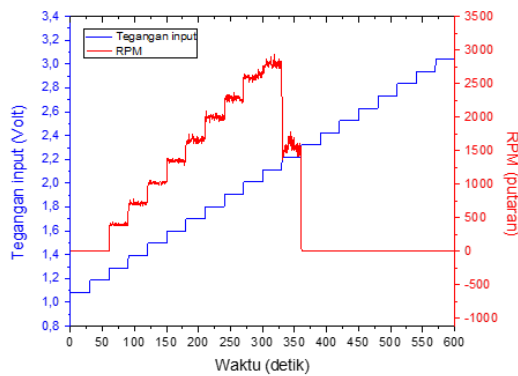
Pada Gambar 17, data diambil dengan waktu *sampling* RPM 0.5 detik dengan maksud agar setiap 0.5 detik jumlah rotasi dihitung ulang. Untuk menghasilkan data RPM maka jumlah rotasi yang terhitung untuk setiap 0.5 detik akan dikalikan dengan 120. Kemudian untuk Gambar 18, data diambil dengan waktu *sampling* RPM 1 detik, maksudnya untuk setiap 1 detik jumlah rotasi dihitung ulang. Untuk menghasilkan data RPM maka jumlah rotasi yang terhitung untuk setiap 1 detik akan dikalikan dengan 60.

Berdasarkan data yang dihasilkan terlihat bahwa motor baru memberikan respons ketika diberikan tegangan sebesar 1.23 Volt. Dan setelah titik tertentu motor akan memberikan putaran maksimum dan setelah itu RPM perlahan-lahan mengalami penurunan. Dari dua data yang diambil dengan perbedaan *time sampling*, data cukup seragam berdasarkan morfologi sinyal pada grafik.

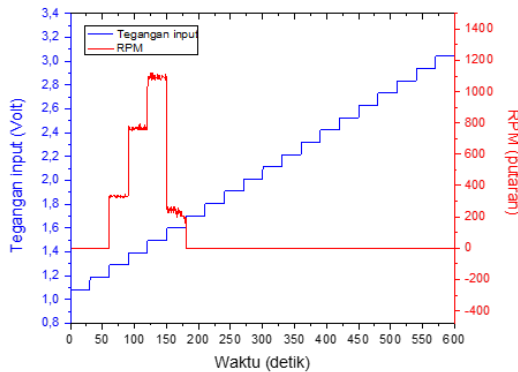
Selain itu, berdasarkan data yang telah diambil untuk kenaikan mulai pada tegangan tertentu tersebut menunjukkan RPM yang dihasilkan juga mengalami kenaikan yang linier mengikuti kenaikan tegangan yang diberikan.

D. Pengujian Sistem Implementasi Pengendali PID

Pada pengujian implementasi sistem pengendali PID sebagai kontrol kecepatan motor listrik *brushless DC*, dilakukan pengambilan data berupa respons sistem ketika



Gambar 19. Hasil perhitungan RPM dari instrumen menggunakan encoder disk dengan lubang berjumlah 10.



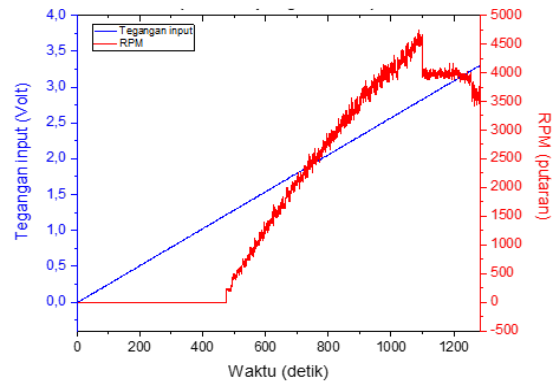
Gambar 20. Hasil perhitungan RPM dari instrumen menggunakan encoder disk dengan lubang berjumlah 30.

pengendali diberi nilai referensi konstan sebesar 3000 RPM. Berdasarkan data yang dihasilkan hasil keluaran pengendali PID yang mengikuti nilai referensi yang ditunjukkan oleh grafik dengan warna biru.

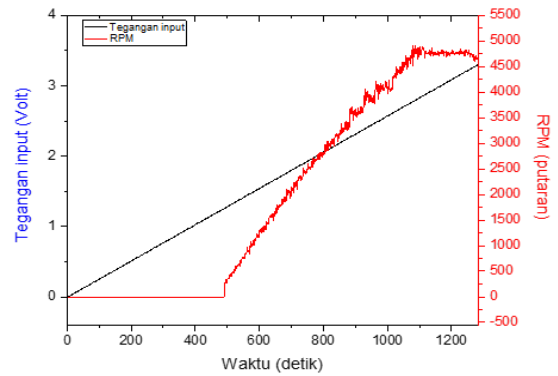
**E. Pengujian Pengendali PID**

Pada pengujian pengendali PID, dilakukan pengujian untuk menemukan pasangan parameter nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang menghasilkan performa pengendalian terbaik. Dari hasil percobaan dengan motor brushless DC pada kondisi tanpa beban dan rangkaian elektronik saja didapatkan beberapa pasangan parameter nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dan hasil *step response* dengan morfologi terbaik. Parameter-parameter tersebut beserta *step response* yang dihasilkan secara berturut-turut adalah  $K_p=0,15$ ,  $K_i=0,0002$ , dan  $K_d=0,001$  menghasilkan *step response* pada Gambar 23. Selanjutnya untuk nilai  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,0001$ , dan  $K_d=0,001$  menghasilkan *step response* pada Gambar 24. Kemudian untuk nilai  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,0002$ , dan  $K_d=0,002$  menghasilkan *step response* pada Gambar 21. Dan yang terakhir untuk nilai  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,00012$ , dan  $K_d=0,0035$  menghasilkan *step response* pada Gambar 22.

Untuk menilai performa dari tiap-tiap parameter dilakukan perhitungan nilai RMSE. Dari hasil perhitungan yang dilakukan, dihasilkan nilai RMSE untuk masing-masing parameter secara berturut-turut sebesar 310,65, 310,99, 311,19, dan 294,09. Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan nilai yang terkecil adalah 294,09 yang mana nilai tersebut dihasilkan dari pasangan parameter dengan nilai  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,00012$ , dan  $K_d=0,0035$ .



Gambar 17. Grafik perubahan RPM untuk setiap perubahan tegangan input dengan waktu *sampling* RPM selama 0,5 detik.



Gambar 18. Grafik perubahan RPM untuk setiap perubahan tegangan input dengan waktu *sampling* RPM selama 1 detik.

**F. Pengujian Baterai**

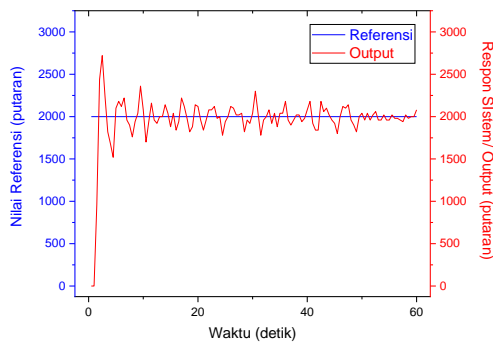
Pada penelitian ini juga dilakukan pengambilan data tambahan guna meninjau kemampuan baterai kursi roda tricycle. Hal ini dilakukan untuk menilai kapasitas dari baterai yang digunakan serta konsumsi energi yang dilakukan oleh kursi roda tricycle. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui jarak tempuh maksimal dari kursi roda tricycle mulai dari baterai terisi penuh hingga habis. Selain itu pengujian ini juga dimaksudkan agar diketahui besar kecepatan yang paling optimal agar kursi roda tricycle dapat menempuh jarak sejauh mungkin.

Pada pengujian baterai kali ini dilakukan sebanyak delapan kali percobaan oleh subjek dengan berat 78 Kg di lingkungan Kampus ITS. Pada pengujian tersebut dilakukan beberapa pendataan meliputi jarak dan waktu berdasarkan aplikasi Speedometer GPS, serta beberapa nilai lain *peak* Watts (Wp), Ampere hours (Ah), Watt hours (Wh), Ampere *peak* (Ap), *minimum* Volts (Vm), dan Voltage (V). Data yang dihasilkan dari setiap percobaan ditunjukkan pada Tabel 1.

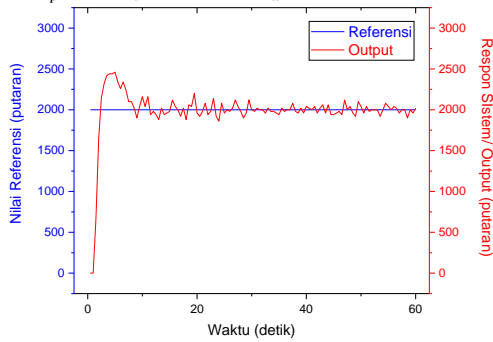
Berdasarkan data yang diambil saat percobaan, kali ini akan difokuskan pada pembahasan mengenai jumlah daya yang dihabiskan oleh kursi roda tricycle tersebut dan dibandingkan dengan jarak yang ditempuh. Dan dari hasil perhitungan 634,43 Wh dibagi dengan 29,12 km diperoleh hasil bahwa daya yang dikeluarkan oleh baterai untuk 21,75089139 Wh/km.

**V. KESIMPULAN**

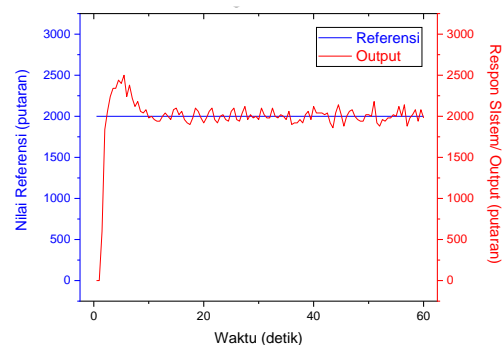
Berdasarkan perancangan, pengujian, serta hasil yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa instrumen dapat digunakan untuk melakukan pengambilan data sehingga



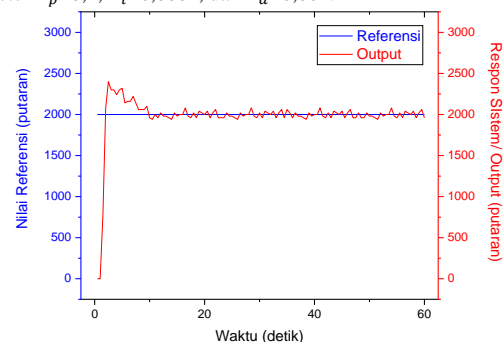
Gambar 23. Step response dari implementasi pengendali PID dengan parameter  $K_p=0,15$ ,  $K_i=0,0002$ , dan  $K_d=0,001$ .



Gambar 24. Step response dari implementasi pengendali PID dengan parameter  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,0001$ , dan  $K_d=0,001$ .



Gambar 21. Step response dari implementasi pengendali PID dengan parameter  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,0002$ , dan  $K_d=0,002$ .



Gambar 22. Step response dari implementasi pengendali PID dengan parameter  $K_p=0,2$ ,  $K_i=0,00012$ , dan  $K_d=0,0035$ .

dapat digunakan untuk melakukan karakterisasi terhadap motor listrik *Brushless* DC dari kursi roda *tricycle* yang diteliti pada kondisi tanpa beban dan tidak terpasang. Kemudian, pemilihan jumlah lubang yang terdapat pada *encoder* sudah sesuai karena mampu dilakukan pembacaan oleh sensor. Dengan demikian, proses perancangan pengendali PID sebagai kontrol kecepatan dari motor dapat dilakukan.

Lebih lanjut, untuk mendapatkan pengendali PID dengan performa yang baik, dilakukan percobaan dengan metode *trial and error*. Dari percobaan tersebut diperoleh parameter dari nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang terbaik secara berturut-turut adalah 0,2, 0,00012, dan 0,0035 dengan RMSE dari hasil *step response* sebesar 294,09. Implementasi dari parameter tersebut menunjukkan bahwa RPM aktual dari motor semakin mendekati nilai referensi yang diberikan. Akan tetapi, tetap diperlukan penelitian lebih lanjut terkait implementasi pengendali PID pada motor listrik *brushless* DC. Hal tersebut lantaran, hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan berupa naik turun secara terus menerus di sekitar nilai referensi yang diberikan.

Kemudian untuk pengujian tambahan, yakni pengujian baterai yang digunakan, dapat dihasilkan kesimpulan di antaranya adalah daya yang dihabiskan untuk setiap kilometer adalah 21,75089139 Wh. Kemudian, beberapa kali GPS mengalami putus koneksi sehingga nilai jarak (km) yang dihasilkan tidak benar-benar valid sehingga diperlukan pengujian ulang.

DAFTAR PUSTAKA

[1] W. Armstrong *et al.*, "Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less resourced settings," 2008. <https://www.who.int/publications/i/item/guidelines-on-the-provision-of-manual-wheelchairs-in-less-resourced-settings> (accessed Dec. 08, 2020).  
 [2] "WHO | Wheelchair Service Training Package - Basic level," 2013.

<https://www.who.int/disabilities/technology/wheelchairpackage/en/> (accessed Dec. 06, 2020).  
 [3] Department of Economic and Social Affairs (United Nations), "Population ageing and sustainable development," 2017.  
 [4] "Road traffic injuries." <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (accessed Dec. 08, 2020).  
 [5] "WHO | Injuries," WHO, 2017. Accessed: Dec. 08, 2020. [Online]. Available: <http://www.who.int/topics/injuries/en/>.  
 [6] "WHO | World Health Organization." <https://www.who.int/disabilities/care/rehab-2030/en/> (accessed Dec. 08, 2020).  
 [7] P. K. Nag, J. T. Panikar, M. G. Malvankar, C. K. Pradhan, and S. K. Chatterjee, "Performance evaluation of lower extremity disabled people with reference to handcranked tricycle propulsion," *Appl. Ergon.*, vol. 13, no. 3, pp. 171–176, 1982.  
 [8] D. Dourte, D. Sanberg, and T. Ogunidipe, "Electric Tricycle Project : Appropriate Mobility," no. May, 2004.  
 [9] C. Deans and P. Harrison, "Advanced Composites, Design and Manufacture of a Combined Wheelchair and Tricycle," *Manuf. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–52, 2011, doi: 10.1016/0263-8223(90)90035-d.  
 [10] A. A. Mohekar, S. V. Kendre, T. N. Shah, P. D. Sonawane, and S. T. Chavan, "Design of Innovative Motorized Tricycle for the Disabled Person," *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, pp. 275–288, 2015.  
 [11] R. Beedu, "Design, Development and Performance Evaluation of Solar Power Assisted Tricycle," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 04, no. 07, pp. 514–518, 2015, doi: 10.15623/ijret.2015.0407082.  
 [12] A. M. Paudel and P. Kreutzmann, "Design and performance analysis of a hybrid solar tricycle for a sustainable local commute," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 473–482, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.078.  
 [13] T. A. Garande and P. Sonawane, "Review of Motorized Tricycle for the Disabled Person," *Int. J. Sci. Res. ISSN (Online Index Copernicus Value Impact Factor)*, vol. 14, no. 2, pp. 2319–7064, 2013, [Online]. Available: [www.ijsr.net](http://www.ijsr.net).  
 [14] J. U. Chu, I. H. Moon, G. W. Choi, J. C. Ryu, and M. S. Mun, "Design of BLDC motor controller for electric power wheelchair," *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics 2004, ICM'04*, no. 2, pp. 92–97, 2004, doi: 10.1109/icmech.2004.1364418.  
 [15] Padmaraja Yedamale (Microchip Technology Incorporated), "Brushless DC motor fundamentals," 2003.  
 [16] R. Yunita, J. Pramudijanto, and E. Iskandar, "Perancangan dan Dengan, Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa PID Self Tuning Regulator (STR)," *J. Tek. Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2014.

- [17] A. Farooq, A. Riaz, B. R. Alyeai, and I. M. Qureshi, "Velocity Control of a Wheelchair Using IMC-PID and IMC-PID Hybridized with Neural Network," *Int. J. Artif. Intell. Appl. Smart Devices*, vol. 4, no. 2, pp. 19–30, Nov. 2016, doi: 10.14257/ijaiasd.2016.4.2.03.
- [18] A. Humaidi and A. Hameed, "Robustness Enhancement of MRAC Using Modification Techniques for Speed Control of Three Phase Induction Motor," *J. Electr. Syst.*, vol. 13, pp. 723–741, 2017.
- [19] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [20] T. J. E. Miller, "Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives," 1989, [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/6911525>.
- [21] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Z. Alam, and A. N. Nordin, "Control BLDC motor speed using PID controller," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 477–481, 2020, doi: 10.14569/ijacsa.2020.0110359.
- [22] S. Manoj, D. Krishna, and T. A. Kumar, "Improving Performance Parameters of PMSM Motor using Fuzzy Sliding Mode Controller," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 3684–3689, Nov. 2019, doi: 10.35940/ijrte.D7942.118419.
- [23] M. R. Khan, A. A. Khan, and U. Ghazali, "Speed Control of DC Motor under Varying Load Using PID Controller," *Int. J. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 38–48, 2015.