



Jurnal Politeknik Caltex Riau

Terbit Online pada laman <https://jurnal.pcr.ac.id/index.php/jkt/>
| e- ISSN : 2460-5255 (Online) | p- ISSN : 2443-4159 (Print) |

Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID)

Made Rahmawaty¹, Thalia Smart Aritonang², Tianur³, Wiwin Styorini⁴ dan Muhammad Diono⁵

¹Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: made@pcr.ac.id

²Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: thalia16tm@mahasiswa.pcr.ac.id

³Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: tian@pcr.ac.id

⁴Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: wiwin@pcr.ac.id

⁵Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: diono@pcr.ac.id

Abstrak

Segway merupakan suatu robot mobile yang memiliki dua buah roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID) digunakan untuk menentukan besarnya kecepatan dan arah putar motor DC sebagai penggerak, sehingga balancing alat ini dapat mempertahankan posisinya tegak lurus dengan seimbang terhadap permukaan bumi pada bidang datar. Alat ini dikendalikan dengan menggunakan suatu pengendali berbasis mikrokontroler dengan menggunakan Arduino, sehingga sistem gerak dari robot ini menjadi otomatis sesuai dengan program yang telah dibuat oleh pengendali. Segway menggunakan sensor modul MPU 6050 sebagai sensor yang didalamnya terdapat gyroscope dan accelerometer sekaligus sehingga memudahkan dalam mendeteksi suatu kecepatan dan percepatan sudut sebagai masukan pada Segway. Data yang dihasilkan akan di olah di Arduino sehingga motor DC akan aktif menyeimbangkan Segway. Segway memiliki sudut maksimum 10° untuk dapat kembali ke titik 0° . Segway dapat setimbang dengan nilai parameter PID yang mendekati optimal adalah $K_p=3.55$, $K_i=0.005$, $K_d=2.05$ dengan memiliki settling time yang cepat dengan waktu 0,71 detik.

Kata kunci: segway, PID, MPU 6050, accelerometer

Abstract

Segway is a mobile robot that has two wheels on the right and left that will not be balanced if there is no controller. The Proportional Integral Derivative (PID) control is used to determine the magnitude and speed of the DC motor rotating as a driving force, so that the balancing tool can maintain its position perpendicular to the surface of the earth on a flat surface. This tool is controlled by using a microcontroller-based controller using Arduino, so that the robot's motion system becomes automatic in accordance with the program created by the controller. Segway uses the MPU 6050 sensor module as a sensor in which there is a gyroscope and accelerometer as well as making it easier to detect a speed and acceleration angle as input to the Segway. The resulting data will be processed in Arduino so that the DC motor will actively balance the Segway. Segways have a maximum angle of 10° to get back to the point of 0° . Segway can be balanced with PID parameter values that are close to optimal are $K_p = 3.55$, $K_i = 0.005$, $K_d = 2.05$ by having a fast settling time at the 0.71 second.

Keywords: segway, PID, MPU 6050, accelerometer

1. Pendahuluan

Segway merupakan alat transportasi jarak dekat dan menggunakan sumber listrik sehingga bebas polusi dan merupakan salah satu aplikasi sistem kendali pendulum terbalik yang ditempatkan pada kendaraan beroda dua. Pada dasarnya Segway digerakkan oleh dua buah motor DC yang dikontrol secara terpisah pada masing-masing roda dan dapat didekati dengan sistem kendali pendulum terbalik. Keseimbangan Segway dibutuhkan agar dapat mempertahankan posisi tegak lurus terhadap permukaan bumi tanpa adanya kontrol dari luar. Hal ini menjadikan Segway memiliki sifat yang tidak stabil dan tidak linear. Karena itu tujuan utama pengontrolan adalah untuk menstabilkan segway pada posisi terbalik dan Kembali pada posisi yang diinginkan.

PID dan Linear quadratic regulator (LQR) sering dijumpai sebagai kontrol linier. Akan tetapi PID dapat diimplementasikan pada sistem linier maupun non-linier. Kontrol PID merupakan kontrol konvensional yang masih digunakan sampai dengan saat ini karena sederhana dan robust bahkan Ketika parameter sistem tidak pasti dan memiliki kemampuan untuk mencapai set point. Sistem non linier dibuat menjadi linier agar lebih mudah dalam pengontrolan. Sistem kontrol PID digunakan untuk menyeimbangkan robot pendulum terbalik setelah dilinierkan. Sistem menunjukkan bahwa sistem dikontrol dengan sempurna disekitar titik kesetimbangan dan fungsi pengontrolan tidak dijalankan secara efektif pada domain diluar keseimbangan [1] [2]. Namun pengontrol logika Fuzzy dan kontrol jaringan saraf adaptif telah digunakan untuk mempertahankan seluruh domain pengontrol. Hanya saja pada saat implementasi respon terhadap ketidak pastian parameter terbatas dan lebih buruk dari pengontrol PID [3][4][5].

Telah banyak studi yang mengembangkan stabilisasi segway dengan menggunakan kontrol PID, tetapi kebanyakan pengujian dilakukan dengan simulasi dengan membuat model matematika dari Segway. Berdasarkan hasil pengujian bahwa sisten dikontrol dengan sempurna disekitar titik keseimbangan [6][7][8]. Penelitian yang mengimplementasikan desain Segway dilakukan oleh [9][10]. Segway dapat mempertahankan posisi tegak pada bidang datar dan sistem kontrol dapat bekerja dengan baik dalam menjaga keseimbangan segway dengan cara memengontrol arah dan putaran motor DC.

Oleh karena itu pada penelitian ini akan melakukan pengembangan sistem kontrol PID untuk menjaga stabiisasi segway. Selain itu akan membuat prototipe segway untuk mengverifikasi desain kontrol PID yang telah diuji secara simulasi dengan menggunakan MATLAB. Pengembangan modul sensor dan aktuator berfungsi untuk memberikan sinyal ke kontroler untuk menjaga agar segway tetap seimbang pada posisi yang diinginkan saat terjadi pergerakan

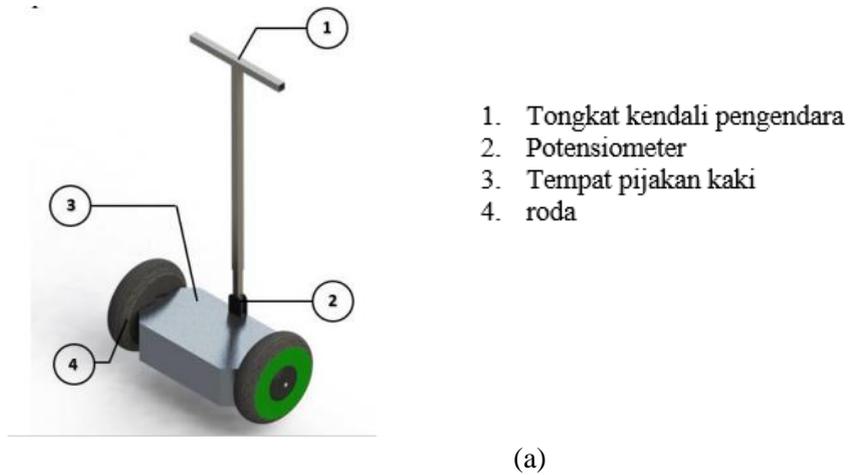
2. Bahan dan Metode

Pada penelitian ini tahapan yang dilakukan adalah perancangan sistem terdiri dari perancangan sistem mekanik, perancangan sistem kontrol, dan integrasi sistem. Kemudian tahap pembuatan segway, dan tahap akhir berupa pengujian. Bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari bahan untuk pembuatan rangka segway berupa stainless dan plat aluminium, bahan untuk sistem penggerak berupa motor motor DC, dan bahan untuk sistem kontrol keseimbangan menggunakan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*.

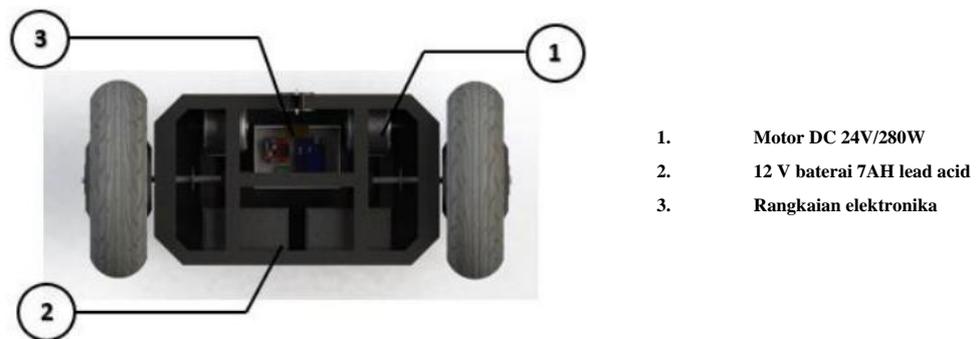
2.1 Rancangan Sistem Mekanik

Perancangan mekanik pada penelitian Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID) disajikan pada Gambar 1. Dimensi segway dengan panjang 400 mm, lebar 300 mm dan tinggi 1100 mm. Rangka utama yang digunakan dari alat ini adalah *stainless* dengan Panjang 1100 mm. Bagian pijakan kaki menggunakan plat aluminium dengan panjang 500 mm dan lebar 300 mm dan tebal 1.2 mm. Selain itu perancangan tata letak komponen perlu dilakukan agar membantu dalam hal menyeimbangkan Segway. Setiap

komponen yang digunakan ditata agar dapat membantu Segway untuk seimbang. Dalam penelitian ini, membutuhkan 2 buah baterai dan 2 buah motor beserta roda. Motor akan diletakkan pada ujung bagian depan pijakan kanan dan kiri agar seimbang. Sementara, baterai akan diletakkan di ujung belakang agar ikut menyeimbangkan Segway. Perancangan tata letak komponen pada penelitian disajikan pada Gambar 2.



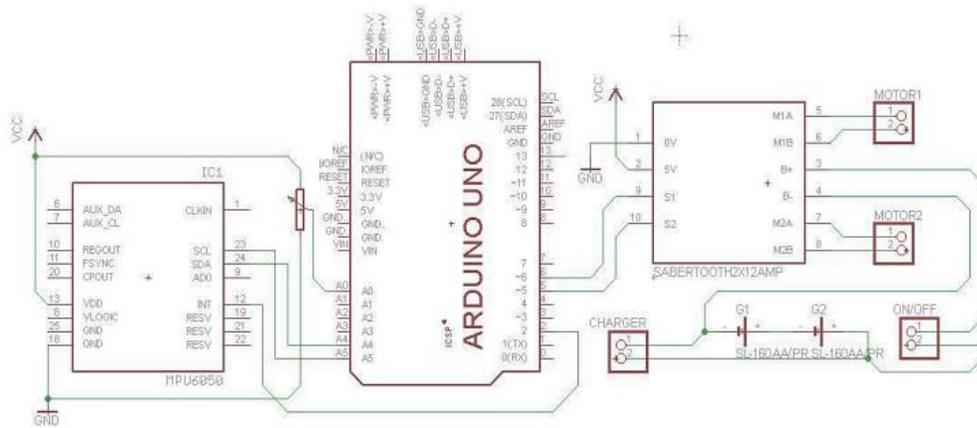
Gambar 1 Perancangan mekanik Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID) (a). isometri (b). tampak depan (c).tampak samping



Gambar 2. Perancangan tata letak komponen elektronika

2.2 Rancangan Sistem Kontrol

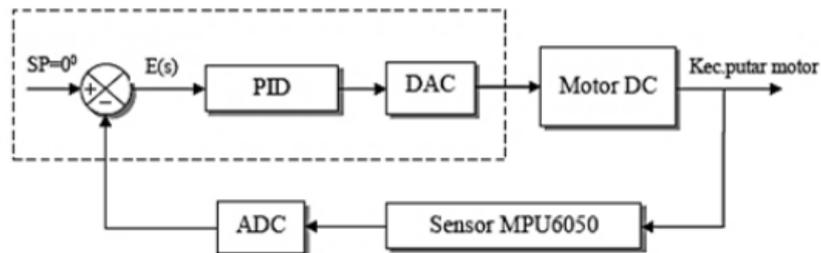
Sistem kontrol dirancang untuk mengatur pergerakan motor pada segway yang berfungsi untuk menjaga keseimbangan segway. Perancangan rangkaian kontrol menggunakan arduino sebagai mikrokontroler dan sensor MPU6050 yang merupakan gabungan dari sensor accelerometer dan sensor gyroscope yang berfungsi untuk membaca nilai sudut atau kemiringan dari tongkat kendali segway. Sudut yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan set point yang nilainya $\leq 10^\circ$. Nilai selisih dari set point dan nilai sudut diolah menggunakan metode kendali Proporsional Integral Derivatif (PID) digital. Proses kendali PID ini diprogram pada Arduino IDE yang hasilnya diumpankan ke motor DC untuk mengatur kecepatan putar motor DC. Rancangan rangkaian kontrol sistem disajikan pada Gambar 3.



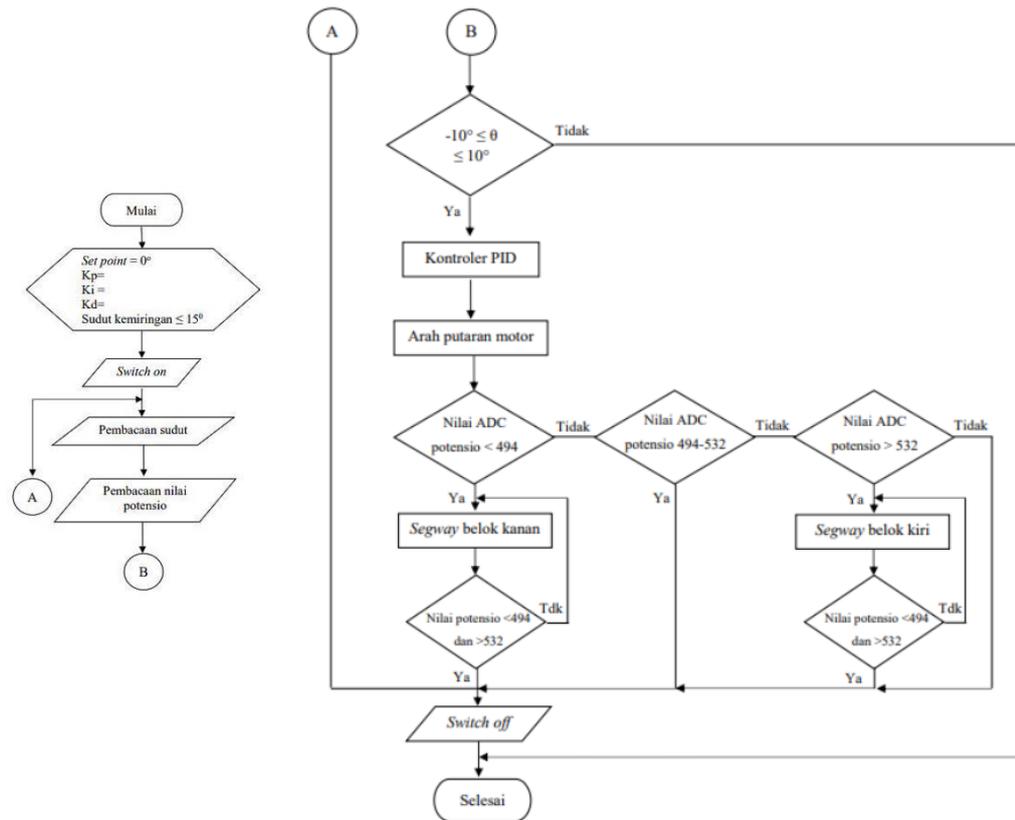
Gambar 3. Rangkaian kontrol sistem keseimbangan segway dengan PID

2.3 Integrasi Sistem

Alur dari Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID) ini menggunakan parameter masukan utama yaitu selisih nilai luaran sistem dengan nilai yang diharapkan (*set point*). Diagram blok kendali PID pada Sistem ini ditunjukkan pada Gambar 4. Proporsional *controler* (K_p) akan memberikan efek mengurangi waktu naik, tetapi tidak menghapus kesalahan keadaan tunak, *Integral controler* (K_i) akan memberikan efek menghapus keadaan tunak, tetapi berakibat memburuknya respon transien, *Diferensial controler* (K_d) akan memberikan efek meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi *over-shoot*, dan menaikkan respon transfer. Nilai setpoint (SP) merupakan nilai referensi yang digunakan sebagai acuan dalam sudut kemiringan segway yang akan dibandingkan dengan nilai ADC dari sensor MPU6050. Jika ada perbedaan dengan nilai setpoint maka akan terdapat error yang akan menjadi acuan kontrol PID dalam menentukan nilai nilai penguatan proporsional, integral dan derivatif dan akan digunakan sebagai acuan dalam mengatur kecepatan putaran motor DC untuk posisi maju atau mundur sehingga nilai sudut mendekati nilai *setpoint* dan menjaga segway agar tetap seimbang.



Gambar 4. Diagram blok Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID)



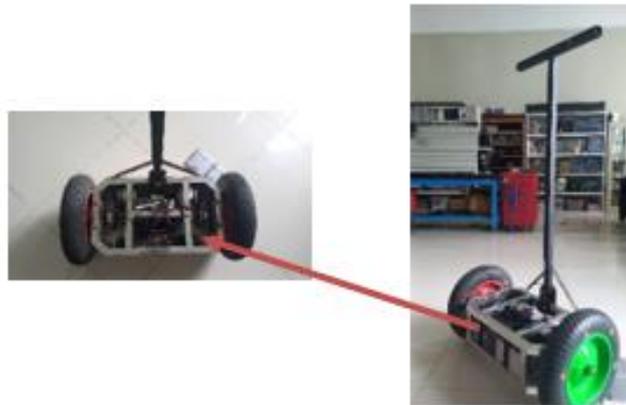
Gambar 5. Diagram alir Sistem Keseimbangan Segway Menggunakan Kontrol Proportional Integral dan Derivatif (PID).

Gambar 5 menyajikan diagram alir berfungsi mendeskripsikan urutan pembuatan program pada alat ini yang berawal dari penentuan set point hingga pengaturan kecepatan motor DC. Proses dimulai dengan mengatur nilai setpoint, Kp, Ki, Kd dan sudut kemiringan. Jika nilai sudut antara -10^0 sampai dengan 10^0 maka controller PID akan bekerja dan mengatur kecepatan putaran motor DC agar segway tetap seimbang, selain itu juga nilai kemiringan tongkat kendali pengendara berdasarkan nilai pembacaan potensio untuk mengetahui apakah pengendara akan belok kekiri, kekanan atau lurus. Berdasarkan nilai ADC potensio maka kecepatan putaran motor akan diatur sesuai dengan pergerakan arah belok pengendara

3. Hasil dan Pembahasan

Segway yang dibuat secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6. Pengujian performansi alat dilakukan dengan pengujian titik keseimbangan dengan cara memiringkan tongkat pengarah pengendara dengan kemiringan sudut antara -10^0 sampai dengan 10^0 kemudian dilakukan pengaturan variasi nilai penguatan Kp, Ki dan Kd sehingga segway dapat kembali ke posisi semula. Pengujian ini dilakukan membandingkan dengan nilai *try and error* dan menguji respon segway untuk kembali ke posisi semula.

Pengujian awal dilakukan dengan melakukan setting sudut kemiringan segway dan melihat respon segway kembali pada posisi semula. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan dengan diberi gangguan dengan setting kemiringan sudut mulai dari 5^0 . Setelah mendapatkan kemiringan maksimal segway untuk kembali ke posisi semula, maka dilakukan pengujian kontroler PID dengan mengatur nilai Kp, Ki dan Kd sehingga segway dapat kembali ke posisi semula dalam waktu singkat



Gambar 6. Hasil rancangan segway dan letak rangkaian elektronika

Pengujian kemiringan segway dengan melihat pada serial monitor Arduino uno untuk mengetahui sudut kemiringan segway berdasarkan pembacaan sensor MPU6050. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan posisi segway dimiringkan kedepan dan kebelakang, Pada pengujian ini akan melihat respon segway apakah dapat kembali ke posisi semula setelah diberi sudut kemiringan yang bervariasi.

Tabel 1. Pengujian respon segway saat dimiringkan kedepan

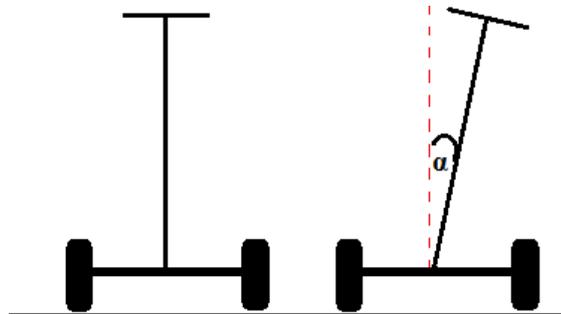
| Dimiringkan kedepan (derajat) | Respon <i>Segway</i> |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 5 | Kembali keposisi semula |
| 10 | Kembali keposisi semula |
| 15 | Tidak kembali keposisi semula |
| 20 | Tidak kembali keposisi semula |
| 25 | Tidak kembali keposisi semula |
| 30 | Tidak kembali keposisi semula |
| 35 | Tidak kembali keposisi semula |
| 40 | Tidak kembali keposisi semula |
| 45 | Tidak kembali keposisi semula |
| 50 | Tidak kembali keposisi semula |

Tabel 2. Pengujian respon segway saat dimiringkan ke belakang

| Dimiringkan kebelakang (derajat) | Respon <i>Segway</i> |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| -5 | Kembali keposisi semula |
| -10 | Kembali keposisi semula |
| -15 | Tidak kembali keposisi semula |
| -20 | Tidak kembali keposisi semula |
| -25 | Tidak kembali keposisi semula |
| -30 | Tidak kembali keposisi semula |
| -35 | Tidak kembali keposisi semula |
| -40 | Tidak kembali keposisi semula |
| -45 | Tidak kembali keposisi semula |
| -50 | Tidak kembali keposisi semula |

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2 dengan melakukan 10 kali percobaan *segway* dimiringkan kedepan dan kebelakang didapatkanlah sudut maksimal *segway* dapat kembali keposisi semula yaitu pada sudut 10°. Pengujian ini akan menjadi acuan dalam penentuan sudut referensi kemiringan maksimal *segway*. Pengujian *steering* dengan potensiometer dilakukan seperti pada Gambar 6. Pengukuran dilakukan dari arah pengendara *Segway*. Arah kemiringan seperti

pada Gambar 7 adalah arah belok kanan. Potensiometer yang digunakan memiliki resistansi 1KΩ dengan keluaran nilai ADC 0-1024 dengan sudut maksimal 270°. Tabel 3 menyajikan nilai ADC berdasarkan nilai resistansi yang diberikan pada tongkat pengendali pengendara. Nilai ADC ini akan menjadi acuan untuk kemiringan sudut bagi pengendara.



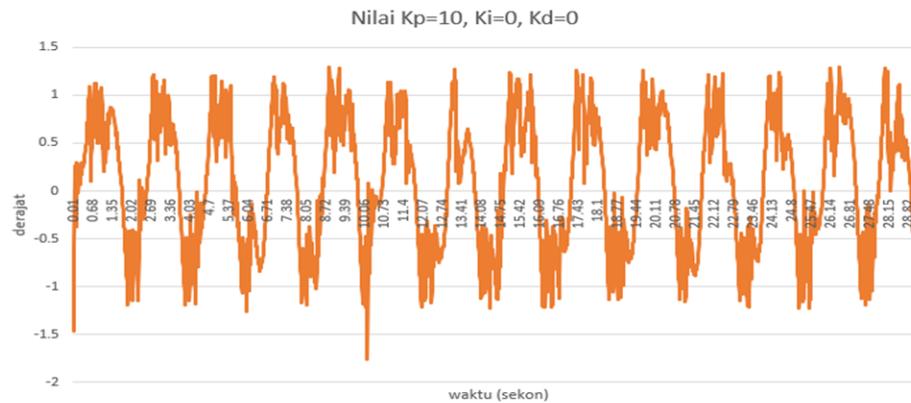
Gambar 7. Skema uji potensiometer steering

Tabel 3 Nilai ADC berdasarkan sudut putaran potensiometer

| No. | Nilai Resistansi (Ω) | Nilai ADC |
|-----|-------------------------------|-----------|
| 1. | 74 | 76 |
| 2. | 148 | 152 |
| 3. | 222 | 228 |
| 6. | 444 | 456 |
| 7. | 481 | 494 |
| 8. | 500 | 513 |
| 9. | 517 | 532 |
| 10. | 570 | 608 |
| 11. | 889 | 912 |
| 12. | 1000 | 1024 |

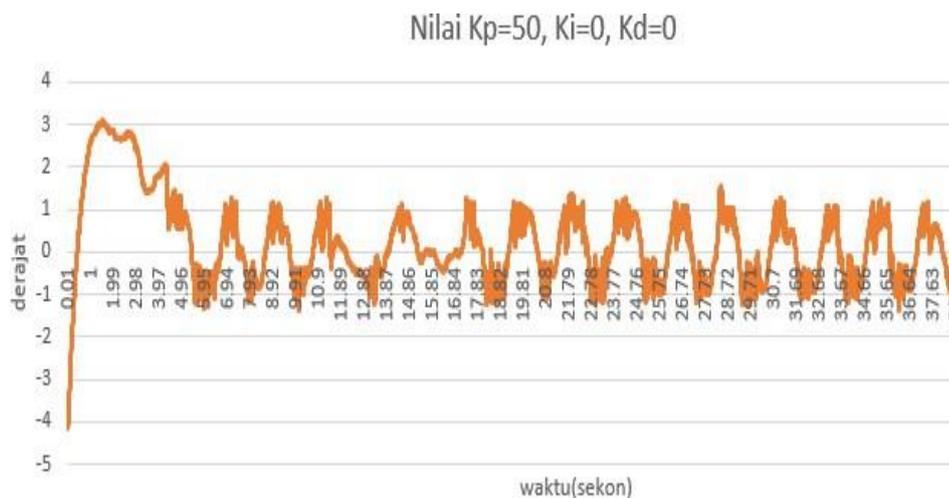
Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memiringkan tongkat pengendali pengendara ke kiri dan ke kanan sebesar 5° dari titik tengah untuk diketahui nilai ADCnya. Berdasarkan percobaan nilai ADC tengah tongkat pengendali adalah 495-531. Nilai ADC maksimal tongkat pengendali dengan kemiringan ke kanan adalah lebih kecil 494 dan nilai ADC maksimal tongkat pengendali dengan kemiringan ke kiri adalah lebih besar dari 532. Nilai ADC tongkat pengendali pada posisi tengah diberi range nilai karena nilai tengah yang dihasilkan oleh potensiometer tidak presisi atau tidak tetap nilainya. Hal ini bertujuan agar sistem tongkat pengendali *segway* tidak terlalu sensitif yang berguna untuk keamanan pengendara.

Setelah melakukan pengujian terhadap posisi kemiringan *segway* selanjutnya adalah pengujian kontroler dengan memberikan nilai parameter K_p , K_i dan K_d dan melihat respon pada *segway*. Pada pengujian ini, dilakukan pengujian data respon *segway* menggunakan kontroler P. Pengujian *segway* dilakukan hanya dengan memberikan nilai pada parameter K_p sedangkan parameter K_i dan K_d diberikan nilai 0. Pengujian juga dilakukan dengan memberikan gangguan pada *segway*. Uji coba pertama pada Gambar 8 diberikan nilai $K_p=10$ didapatkan *error* mencapai -1.8 dan 1.4. Nilai *error* mencerminkan pergerakan *segway*. Nilai *error* ini tidak terlalu besar hingga *segway* tidak akan terjatuh dalam waktu yang lama sekalipun. Namun, sistem tetap beresilasi dalam waktu yang lama dan tidak mampu mencapai nilai *setpoint* yang diharapkan.



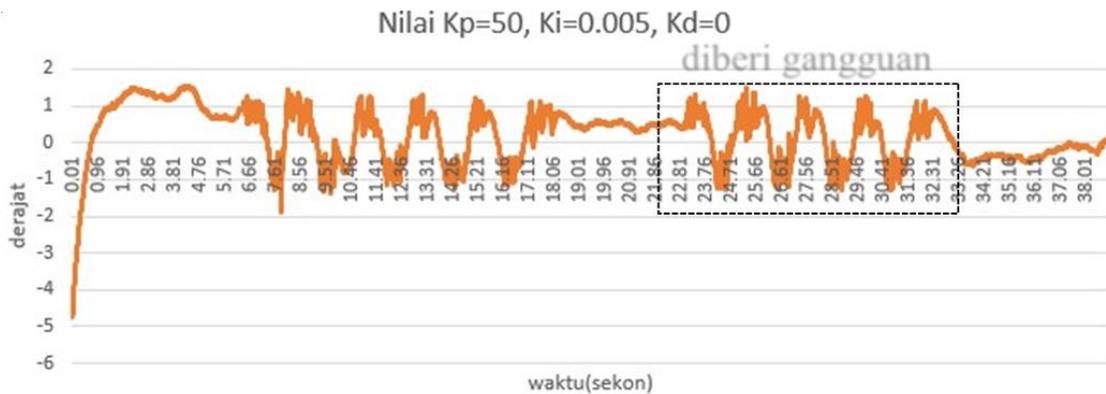
Gambar 8 Hasil respon segway saat nilai $K_p=10$, K_i dan $K_d = 0$

Selanjutnya pengujian dengan memberi nilai $K_p=50$ dan nilai K_i dan K_d adalah 0. Berdasarkan Gambar 9 didapat respon *segway* memiliki *overshoot* dan waktu naik sekitar 1,5 detik dan waktu untuk mendekati nilai *steady state* sekitar 5,95 detik. Setelah itu sistem berosilasi namun tidak mampu mencapai *set point* yang diharapkan.



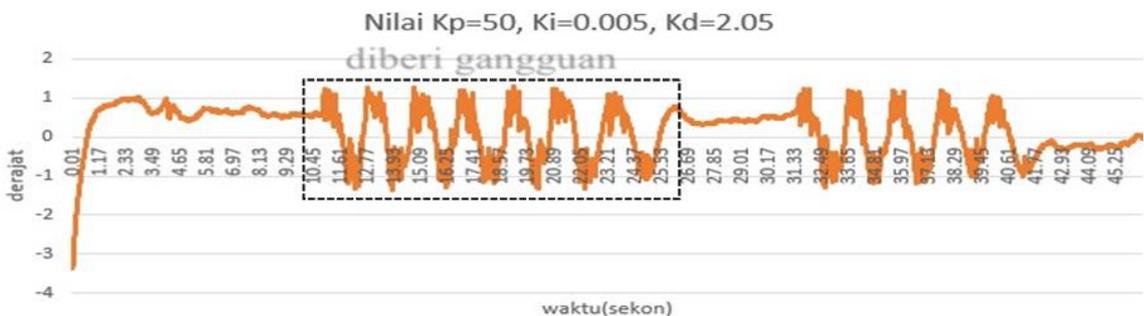
Gambar 9 Hasil respon segway saat nilai $K_p=50$, K_i dan $K_d = 0$

Setelah melakukan pengujian dengan kontroler proportional dengan melakukan *tuning parameter* nilai K_p , didapatkan hasil respon yang memiliki overshoot yang masih tinggi dan segway belum mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan, maka selanjutnya dilakukan pengujian respon *segway* menggunakan kontroler PI. Pengujian *segway* dilakukan hanya dengan mengatur nilai pada parameter $K_p = 50$ dan $K_i = 0.005$ sedangkan parameter K_d diberikan nilai 0. Pengujian juga dilakukan dengan memberikan gangguan pada *segway*. Berdasarkan Gambar 10 terlihat terjadi penurunan *overshoot* dan *risetime* dibandingkan dengan pengujian dengan kontroler proportional sebelumnya. Tetapi waktu sistem untuk mencapai *steady state* lebih lama dari pengujian sebelumnya yaitu sekitar 7,61 detik dan sistem berosilasi dan mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan sekitar 33,26 detik.



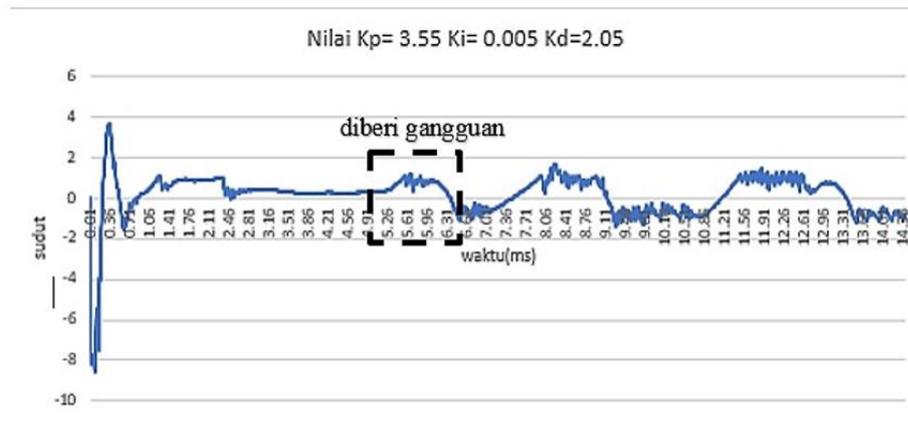
Gambar 10. Hasil respon segway saat nilai $K_p=50$, $K_i= 0,005$ dan $K_d=0$

Berdasarkan percobaan dengan kontroler proporsional dan integral masih terdapat *overshoot*, untuk itu untuk mengurangi *overshoot* dilakukan pengujian dengan menggabungkan ketiga kontroler PID untuk melihat respon *segway*. Pengujian *segway* dilakukan dengan memberikan nilai pada parameter $K_p=50$, $K_i = 0,005$, dan $K_d= 2,05$, selain itu dalam pengujian juga diberikan gangguan pada *Segway*. Pada Gambar 11 terlihat *overshoot* yang terjadi jauh lebih rendah dibandingkan dengan kontroler PI yang telah diuji sebelumnya. Sistem sudah dapat seimbang namun masih belum mencapai *set point* yang diharapkan. Ketika diberi gangguan pada detik ke-11,61, *segway* telah dapat seimbang kembali pada detik ke-25,53. hingga akhirnya *segway* mampu mencapai *setpoint* yang diharapkan pada detik ke-41,77.



Gambar 11. Hasil respon segway saat nilai $K_p=50$, $K_i= 0,005$ dan $K_d=2,05$

Pada pengujian ini, dilakukan pengujian data respon *segway* menggunakan kontroler PID. Pengujian *segway* dilakukan dengan parameter nilai K_p berubah dan K_i dan K_d tetap. Pengujian juga dilakukan dengan memberikan gangguan pada *segway*. Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat ketika K_p bernilai 3,55 dan K_i bernilai 0,005 dapat dilihat bahwa *error* yang terjadi sudah mendekati nol, nilai *overshoot* yang dihasilkan lebih besar tetapi waktu turunnya cepat dan *settling time* jauh lebih cepat pada detik ke 0,1 dan pergerakan robot dalam mencapai kesetimbangan lebih halus. Ketika diberi gangguan pada detik ke-5 maka robot beresilasi hingga detik ke-12 setelah itu robot mencapai kesetimbangan.



Gambar 12. Hasil respon segway saat nilai Kp=3,55, Ki= 0,005 dan Kd=2,05

4. Kesimpulan

Sistem kontrol PID untuk keseimbangan *segway* sudah berhasil dirancang dan dibuat. Setelah melalui berbagai pengujian dapat disimpulkan bahwa kinerja kontrol PID pada *segway* sudah dapat mengembalikan *segway* ke nilai *setpoint* yang diinginkan. *Segway* memiliki sudut kemiringan maksimum 10° untuk dapat kembali ke titik 0° . *Segway* dapat kembali ke posisi semula dengan nilai parameter penguatan PID yang mendekati optimal yaitu dengan nilai penguatan proporsional (K_p) =3,55, nilai pengiatan integral (K_i) =0,005, dan nilai penguatan derivatif (K_d) =2,05 dengan memiliki *settling time* yang cepat dengan waktu 0,71 detik.

Daftar Pustaka

- [1] L. P. Ketaren, M. Ma'a, and D. M. Rahmawaty, "Jurnal Politeknik Caltex Riau Balancing Robot Beroda Dua Menggunakan Metoda Kontrol Proporsional, Integral dan Derivatif," 2016. [Online]. Available: <http://jurnal.pcr.ac.id>
- [2] G. Bobby, E. Susanto, and Y. Suratman, "Implementasi Robot Keseimbangan Beroda Dua Berbasis Mikrokontroler," *ELKOMIKA*, vol. 3, no. 2, pp. 142–160, 2015.
- [3] C. H. Huang, W. J. Wang, and C. H. Chiu, "Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2988–3001, Jul. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2069076.
- [4] S. Chauhan, R. Vishwakarma, V. Singh, and R. Kumar, "Stability Analysis of Inverted Pendulum Using PID and Fuzzy Controller," *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 5, no. 1, pp. 59–62, 2016, [Online]. Available: www.erpublication.org
- [5] M. Rahmawaty, "Modeling, Simulation, and Stabilization of Two Wheels Inverted Pendulum Robot Using Hybrid Fuzzy Control," *Indonesian Journal of electronics, electromedical engineering, and medical informatics*, vol. 3, no. 3, pp. 93–98, Aug. 2021, doi: 10.35882/ijeemi.v3i3.2.
- [6] M. R. Bageant, "Balancing a Two-Wheeled Segway Robot," 2011.
- [7] J. van der Veen, "Stabilization and Trajectory Tracking of a Segway," 2018.
- [8] A. Purna Irawan and D. Widya Utama, "Konsep Desain Sistem Kontrol Pada Perancangan Segway," *Jurnal Kajian Teknologi*, vol. 9, no. 2, pp. 119–125, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/299404243>
- [9] L. B. Setyawan, D. Susilo, D. Irawan, and U. Kristen Satya Wacana, "SISTEM KENDALI GERAK SEGWAY BERBASIS MIKROKONTROLER," *Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, vol. 13, no. 1, pp. 125–134, 2014.
- [10] H. Yun, H. Zhang, and J. Lee, "Stability Improvement of Segway Based on Tire Model Using the SEA," *Robotica, Cambridge University Press*, vol. 40, no. 2, 2021.