

Perancangan Sistem Kontrol Hybrid Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink

I Made Mahatma Tantra Nagendra, I Wayan Widhiada, dan I Ketut Adi Atmika

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Segway adalah alat transportasi sederhana dengan sumber daya listrik sehingga lebih ramah lingkungan dan lebih hemat daya. Segway didesain sedemikian rupa untuk mempermudah mobilitas pada transportasi jarak dekat baik diluar ruangan maupun dalam ruangan. Sehingga prototype yang dirancang pada penelitian ini, dengan menggunakan teori *inverted pendulum* dan pemodelan sistem kontrol. Penelitian ini hanya sebatas menyeimbangkan *prototype* Segway secara statis dengan diberikan gaya luar berupa sudut referensi sebesar 15° dan -15° dengan menggunakan sistem kontrol hybrid. Dimana sistem kontrol hybrid adalah kombinasi antara sistem kontrol PID dan Fuzzy Logic yang dirancang menggunakan *software* matlab/Simulink. Dengan tujuan untuk mendapatkan *overshoot*, $error \leq 5\%$ dan *settling time* seminim mungkin.

Kata Kunci: Segway, Balancing robot, Control, Matlab

Abstract

Segway is simple transport equipment with electricity power source that is more environmentally friendly and more power efficient. Segway is designed in such a way as to facilitate mobility in short distance transportation both outdoors and indoors. So that the prototype designed in this study, using inverted pendulum theory and control system modeling. This research is only limited to balancing the Segway prototype statically with an external force in the form of a reference angle of 15° and -15° using a hybrid control system. Where the hybrid control system is a combination of PID control system and Fuzzy Logic which is designed using the matlab / Simulink software. In purpose of getting *overshoot*, error under 5% and minimal *settling time*.

Keywords: Segway, Balancing robot, Control, Matlab

1. Pendahuluan

Manusia modern zaman sekarang dapat dikatakan masih hidup secara berpindah tempat, namun dalam artian lain. Berpindah yang dimaksud adalah berpindah dari satu tempat menuju tempat lain seperti, merantau, melakukan aktifitas sehari-hari, atau melakukan sebuah perjalanan. Dalam melakukan sebuah perjalanan diperlukan sebuah media bernama transportasi.

Transportasi adalah berpindahnya manusia atau barang dari satu tempat ke tempat lainnya dengan menggunakan sebuah kendaraan yang digerakan manusia atau mesin. Kini transportasi telah dirancang dengan pengaplikasian sebuah kecerdasan buatan yang canggih. Salah satu contoh alat transportasi yang menggunakan kecerdasan buatan adalah *segway*.

Segway merupakan alat transportasi baru yang dikembangkan oleh manusia dan juga ramah lingkungan karena tanpa menggunakan bahan bakar sehingga dampak pemanasan global akibat kendaraan berbahan bakar [1]. *Segway* adalah pengembangan dari model pendulum terbalik (*inverted pendulum*) yang diletakkan diatas sebuah kereta beroda. Komponen yang mendukung kecerdasan buatan tersebut adalah mikrokontroler yang berfungsi sebagai otak dari sistem kontrol. Mikrokontroler yang umum digunakan adalah Arduino, yang menawarkan berbagai jenis mikrokontroler sesuai dengan kebutuhan. Dengan

mengadopsi mikrokontroler dan model *inverted pendulum*, kendaraan ini mampu melintasi suatu medan dengan beban secara seimbang [2].

Untuk menyeimbangkan *segway* dapat diatur dengan implementasi kontrol atau alat untuk memerintah, mengendalikan, dan mengatur keadaan dari suatu sistem agar gerak lebih optimal. Ada beberapa macam aksi kontrol. Diantaranya PID Control atau Proporsional, Integral, Derivatif kontrol. Dimana masing-masing kontrol tersebut memiliki keunggulan. Lalu pengembangan teknologi untuk mendapatkan suatu hasil yang diinginkan dengan menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan berupa *If – Then Rules* (Jika – maka). Sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Sistem ini disebut dengan sistem kendali logika fuzzy [3].

Pemakaian kontrol PID masih dianggap kurang memuaskan karena jika menggunakan aksi kendali PID didapatkan jika suatu kontroler di set sangat sensitif, maka *overshot/undershot* yang dihasilkan akan semakin peka. Sehingga osilasi yang ditimbulkan akan semakin tinggi. Apabila sebaliknya, maka waktu yang dibutuhkan akan semakin lama [3]. Maka dari itu penelitian ini akan mencoba menggabungkan sistem kontrol PID dan logika fuzzy atau yang bisa disebut sistem kontrol *Hybrid*.

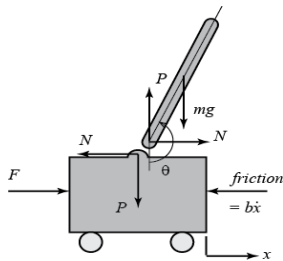
Dalam penelitian ini, sistem kendali utama adalah logika *fuzzy* yang berfungsi untuk meminimalkan *recovery time* dari respon sistem sedangkan kontrol PID bekerja untuk meminimalkan *overshot/undershot* yang terjadi. Dari desain sistem kontrol *hybrid* antara logika *fuzzy* dengan kontrol PID ini hanya diuji pada gerak statis yang diharapkan sistem kendali dapat menghasilkan respon sistem yang lebih baik. Tujuan utama dari pengaplikasian sistem kontrol pada *segway* ini adalah untuk menguji alat agar bergerak ke posisi *steady state* (seimbang) setelah diberikan gaya dari luar atau sudut kemiringan waktu seminim mungkin. Sudut kemiringan tersebut dibatasi sebesar 15° kearah depan dan -15° kearah belakang karena rangka dari prototype *Segway* sudah menyentuh permukaan tanah saat diberikan gaya luar.

2. Dasar Teori

2.1. Inverted Pendulum

Inverted pendulum atau pendulum terbalik adalah pendulum yang mempunyai titik berat diatas titik tumpunya. Dimana tumpuan berupa kereta beroda yang bergerak maju dan mundur pada bidang horizontal [4].

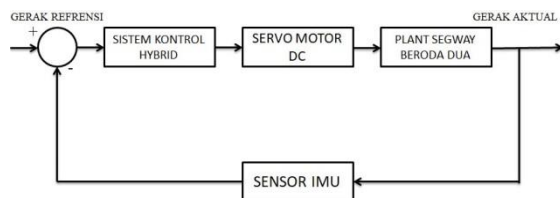
Sistem dalam contoh ini terdiri dari pendulum terbalik yang dipasang pada kereta (*Cart*) bermotor. Sistem ini diketahui tidak stabil tanpa kontrol jadi, Tujuan dari sistem kontrol adalah untuk menyeimbangkan pendulum terbalik dengan menerapkan gaya pada gerobak tempat pendulum terpasang [5].



Gambar 1. Prinsip *Segway* beroda dua

2.2. Sistem Kontrol

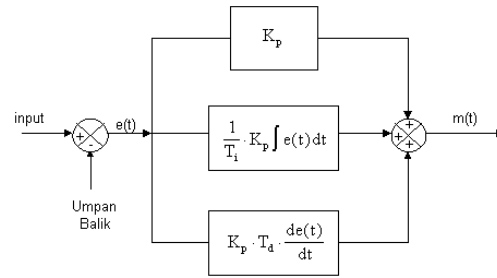
Sistem kontrol merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses.



Gambar 2. Sistem kontrol

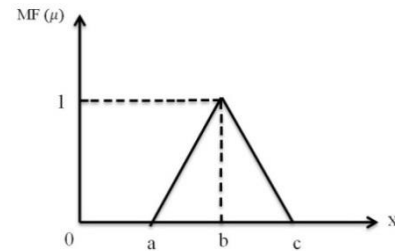
Penggunaan Sistem kontrol PID kebanyakan dilakukan dengan metode coba-coba atau *trial & error*. Karena parameter K_p , T_i , dan T_d tidak *independent*. Elemen-elemen controller P, I dan D

masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar [6].



Gambar 3. Blok Diagram PID

Logika *fuzzy* merupakan sebuah logika yang memiliki derajat keanggotaan diantara 0 dan 1. Dengan demikian, variabel dalam logika *fuzzy* dideskripsikan dalam bentuk himpunan *fuzzy*. bentuk himpunan fuzzy, diantaranya dalam bentuk segitiga, trapezoidal, Gaussian, Gaussian-bell dan sigmoid [7].

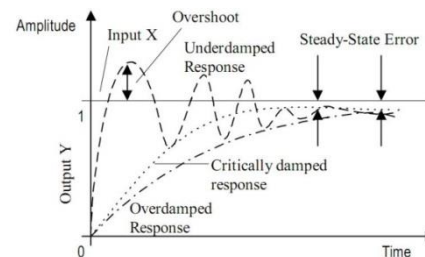


Gambar 4. Himpunan Fuzzy Segitiga

Pada penelitian ini, kontroler yang digunakan adalah gabungan antara kontrol PID dengan logika *fuzzy* atau *Hybrid*. Kombinasi kontrol ini akan menunjukkan seberapa baik kontrol dalam memperoleh sinyal, meminimal *error steady state*, *settling time*, dan *maximum overshoot* dibanding menggunakan salah satu dari kontrol [3].

2.3 Respon Tanggap Sistem

Setelah membuat sistem kontrol yang sesuai, untuk mengetahui nilai *output* yang dihasilkan oleh sistem yang akan di operasikan dengan analisis tanggapan dari suatu sistem. Respon sistem yang diamati mulai saat terjadinya perubahan sinyal input/gangguan/beban sampai respon masuk dalam keadaan *steady state*.



Gambar 5. Bentuk sinyal Respon Transien Respon *steady state* adalah respon sistem yang diamati mulai saat respon masuk dalam keadaan *steady state* sampai waktu tak terbatas.

3. Metode penelitian

Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1. Alat dan Bahan

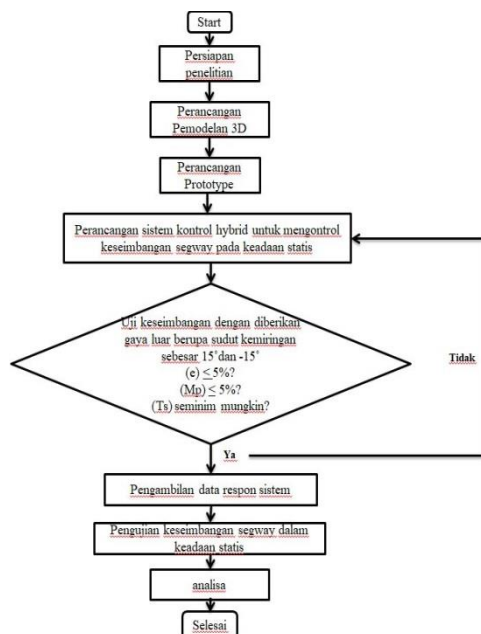
1. Komputer atau Laptop.
2. Besi hollow
3. DC Motor MY1016
4. Mikrokontroler Arduino UNO
5. Sensor MPU 6050
6. Motor Driver BTS7960
7. Aki

3.2. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan sebagai berikut.

1. Mendesign model prototype dengan menggunakan komputer/laptop pada *software* Autodesk Inventor dengan *student lisence*.
2. Membuat pemodelan sistem kontrol menggunakan *software* matlab/simulink.
3. Pemodelan dibuat menjadi 2 bagian yaitu pemodelan sederhana, dan dengan menggunakan sistem kontrol hybrid.
4. Mengatur fungsi pada sistem kontrol hybrid sehingga menghasilkan output sinyal.
5. Output sinyal dianalisa untuk mengetahui seberapa mampu sistem kontrol untuk meminimalisir *overshoot*, *error*, dan *settle time*.
6. Merancang dan menguji prototype Segway.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram alir penelitian

3.3. Analisa Data

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental, dimana peneliti menguji hipotesis sebab-akibat

melalui pemanipulasian variabel bebas. Variabel bebas merupakan *input* dari sistem kontrol *Hybrid* dan variabel terikat merupakan *output* berupa gerak actual *prototype*. Data yang di dapat berupa grafik respon transien gerak sistem *Segway* beroda dua dan dibuat pembahasan dari data sehingga di dapat kesimpulan dari penelitian ini.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pembuatan Prototype Segway

Setelah mendesign prototype Segway, terdapat 2 langkah yang perlu dilakukan yaitu pembuatan rangka dan pemasangan komponen kelistrikan.



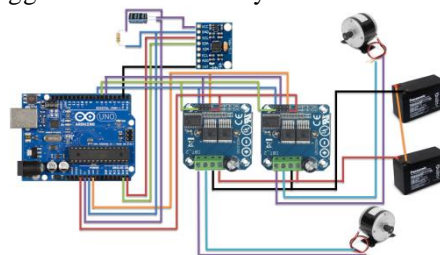
Gambar 7. Design Prototype Segway

4.1.2. Pembuatan Rangka Prototype

Pembuatan rangka mengikuti ukuran sesuai dengan design 3D. adapun penggunaan peralatan tambahan seperti bor, gerinda, penggaris, dll dengan tujuan mempermudah dalam pembuatan rangka.

4.1.3. Pemasangan Komponen Kelistrikan

Rangkaian kelistrikan *prototype Segway* dibuat untuk menyambungkan komponen-komponen agar Segway mampu bergerak menggunakan sumber daya listrik.



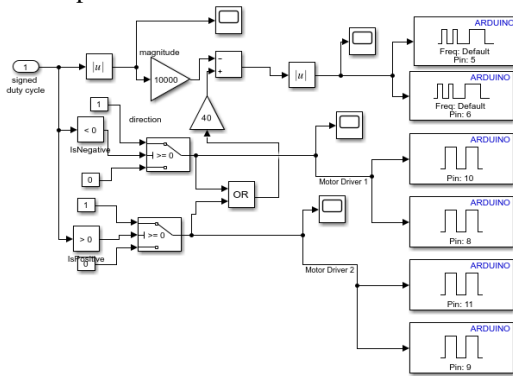
Gambar 8. Rangkaian kelistrikan

4.2. Pemodelan Sistem Kontrol

Setelah tahapan pembuatan prototype Segway selesai, tahap berikutnya adalah dibuatkan pemodelan dari sistem kontrol untuk mikrokontroler.

Gambar dibawah menunjukkan sinyal input yang masuk kedalam plant logic, sinyal disini merupakan sinyal keluaran dari input referensi yang berupa sudut. jika sinyal nilainya positif maka motor akan bergerak kearah negatif begitu juga sebaliknya jika

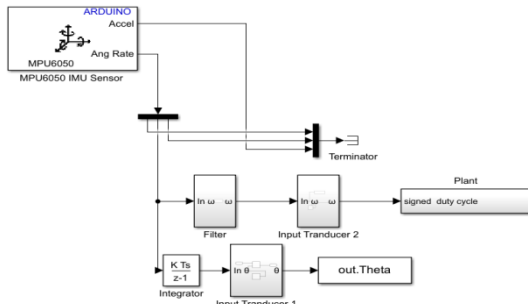
nilai sudut negatif maka motor akan bergerak kearah positif.



Gambar 9. Diagram blok gabungan antara Plant Logic dan PWM Logic

4.3. Sistem Kontrol Sederhana

Pemodelan sistem kontrol sederhana dibuat sebagai referensi perbandingan antara pemodelan sistem dengan ditambahkan sistem kontrol *hybrid*.



Gambar 10. Diagram blok Simulink sederhana tanpa kontrol

Sinyal dari sensor MPU 6050 merupakan sinyal input yang akan masuk ke filter dimana fungsinya untuk menstabilkan sinyal input dari MPU 6050 dengan menyaring frekuensi sinyal yang terlalu tinggi dan rendah dengan menggunakan low dan high pass menjadi sinyal yang dibutuhkan plant.

4.4. Pemodelan Sistem Kontrol Fuzzy

Putaran motor DC akan diatur dengan sinyal digital yang diterima arduino dari sudut yang terbaca pada sensor MPU6050. Dengan mengikuti parameter sebagai berikut:

Parameter Input :	Membership Function:
Range=[-20 20]	Range=[-20 20]
'CW_Besar':trimf,[-180-15-10]	'CW_Besar':trimf,[-180-15-10]
'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5]	'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5]
'CW_Kecil':trimf,[-0.5 0 0.5]	'CW_Kecil':trimf,[-10-5 0]
'Seimbang':trimf,[10-5 0]	'Seimbang':trimf,[-2.5 0 2.5]
'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10]	'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10]
'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15]	'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15]
'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]	'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]
Parameter Output :	Membership Function:
Range=[-20 20]	CW_Besar
'CW_Besar':trimf,[-180-15-10]	CW_Sedang
'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5]	CW_Kecil
'CW_Kecil':trimf,[-10-5 0]	Seimbang
'Seimbang':trimf,[-2.5 0 2.5]	CCW_Kecil
'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10]	CCW_Sedang
'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15]	CCW_Besar
'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]	

Gambar 11. Parameter yang digunakan pada fuzzy logic

Adapun Rule/Aturan yang digunakan:

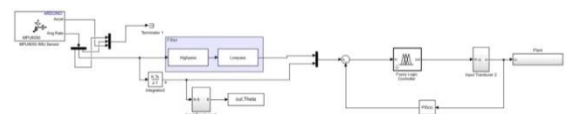
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CW_Besar) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Besar) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
- If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
- If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
- If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
- If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
- If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
- If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
- If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
- If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
- If (Angle is CCW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
- If (Angle is CCW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Besar) (1)
- If (Angle is CCW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Besar) (1)
- If (Angle is PM) and (Rate_of_Angle is PM) then (Angle is PM) (1)

Gambar 12. Rule/Aturan fuzzy logic.

4.5. Pemodelan Sistem Kontrol PID

Sistem kontrol PID dibuat dengan menentukan nilai Kp, Kd, dan Ki dengan cara melakukan *trial-error* pada *simulink*. Setelah melakukan *trial-error* beberapa kali, parameter yang didapat antara lain Kp = 2, Ki = 0 dan Kd = 0. Nilai parameter yang telah didapatkan diinput pada sistem kontrol.

4.6. Pemodelan Sistem Kontrol Hybrid



Gambar 13. Diagram Blok menggunakan Sistem Kontrol Hybrid

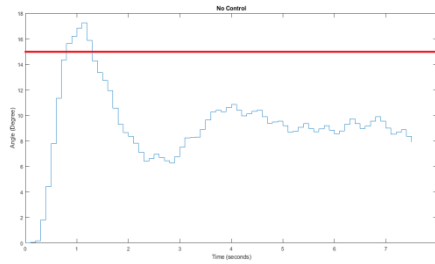
Pemodelan sistem kontrol *hybrid* dibuat dengan menggabungkan sistem kontrol *Fuzzy* dan *PID* yang telah dibuat, sehingga mendapatkan Skema blok diagram Sebagai berikut.

4.7. Pengambilan Data dan Analisa

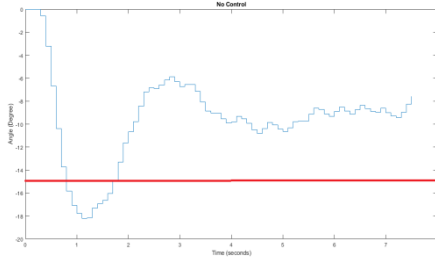
Pengambilan data dan analisa dilakukan dengan cara mengimplementasikan pemodelan kontrol sederhana dan *hybrid* pada Arduino UNO.

Pertama, pengujian dilakukan dengan mengambil data pada sistem kontrol sederhana. Pemodelan dilakukan *running*

pada *software* sehingga didapatkan grafik respon transien sebagai berikut.

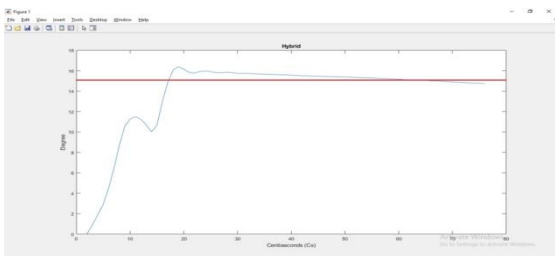


Gambar 14. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan 15°



Gambar 15. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan -15°

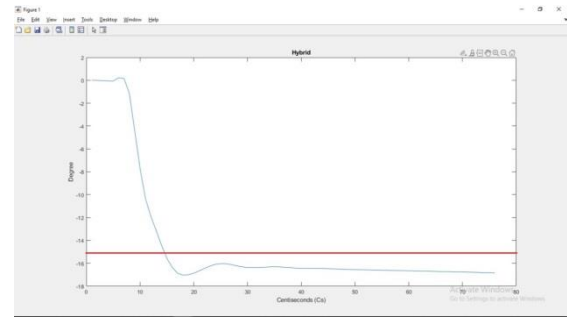
Grafik diatas menunjukkan bagaimana respon sinyal terhadap *prototype* dengan diberikan gaya luar berupa kemiringan sudut maksimal 15° ke depan dan -15° ke belakang. diketahui bahwa respon sinyal pada sistem kontrol mencapai *peak overshoot* yang tinggi melewati garis referensi (garis merah) dan memiliki osilasi yang besar dengan keadaan tidak stabil yang menyebabkan tidak mendapat *settle time* karena tidak mencapai posisi *steady state*. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya pengatur gerakan motor atau kontrol yang dapat menurunkan osilasi, sehingga gerakan *Segway* tidak stabil. Osilasi besar diakibatkan karena sinyal yang dihasilkan oleh sensor sangatlah sensitif sehingga sensor memberikan banyak data.



Gambar 16. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan 15°

Pengujian selanjutnya menggunakan sistem kontrol *hybrid*. Pemodelan Sistem yang sudah dibuat dilakukan running

sehingga mendapatkan grafik transien respon sebagai berikut.



Gambar 17. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan -15°

Grafik respon sinyal diatas menunjukkan bahwa sinyal masuk pada sistem kontrol *hybrid* mengalami ketidak normalan. Dimana sinyal masuk mengalami penurunan setelah mencapai posisi *steady state* yang berbeda dari keadaan riil nya ketika diberikan gaya dari luar berupa kemiringan sudut sebesar 15°

Beginipun pada sudut -15° mengalami ketidak normalan juga. Dimana sinyal respon mencapai posisi *steady state* diatas garis referensi. Walaupun demikian dibandingkan dengan kontrol sederhana, kontrol *hybrid* mencapai *peak overshoot* yang lebih rendah dibandingkan kontrol sederhana. Serta osilasi yang lebih rendah dan tercapainya *settle time* untuk mencapai posisi *steady state*.

Tabel 1. Tabel Data Pengujian

time	tanpa control		hybrid	
	15	-15	15	-15
0	0	0	0	0
0.1	0.03328	-0.0015	-0.03904	-0.01373
0.2	0.17666	-0.0037	0.163048	-0.03983
0.3	1.79184	-0.5852	3.157616	-0.05699
0.4	4.43442	-3.2267	5.635483	-0.07004
0.5	7.79206	-6.693	9.011261	0.2211
0.6	11.3472	-10.382	11.51439	0.163422
0.7	14.3391	-13.739	13.28725	-1.10756
0.8	15.6306	-15.838	13.24591	-4.39728
0.9	16.2008	-17.056	13.17702	-7.69249
1	16.8346	-17.794	13.11042	-10.3409
1.1	17.2436	-18.206	13.08286	-11.8865
1.2	15.8731	-18.169	13.06908	-13.1396
1.3	14.2897	-17.315	13.04153	-14.4209
1.4	13.3387	-16.921	13.00249	-15.5704
1.5	12.7272	-16.631	14.53192	-16.3799
1.6	11.9529	-16.053	17.09476	-16.875
1.7	10.5546	-14.895	17.08098	-17.0357
1.8	9.27557	-13.291	17.09246	-17.0075
1.9	8.63549	-11.619	17.05342	-16.8674
2	8.3641	-10.664	17.02816	-16.6656
2.1	7.81364	-9.7997	16.99831	-16.4465
2.2	7.10846	-8.438	16.9386	-16.2515
2.3	6.41792	-7.182	16.89956	-16.1018
2.4	6.59604	-6.832	16.85593	-16.0352
2.5	6.95741	-6.8949	16.8054	-16.0428
2.6	6.70065	-6.5964	16.75488	-16.1204
2.7	6.45596	-6.1634	16.69977	-16.2275
2.8	6.28259	-5.8909	16.6148	-16.3147
2.9	6.76648	-6.3023	16.60102	-16.3689
3	7.48848	-6.7456	16.58495	-16.3847
3.1	8.24048	-6.5565	16.52524	-16.3689
3.2	8.26754	-6.5485	16.47931	-16.3504
3.3	8.28144	-7.1641	16.44486	-16.3209
3.4	8.91895	-8.0759	16.40582	-16.3092
3.5	9.63876	-8.8506	16.36449	-16.3202
3.6	10.284	-9.0312	16.291	-16.3552
3.7	10.4087	-9.0323	16.29559	-16.3889
3.8	10.2726	-9.5378	16.26115	-16.4239
3.9	10.5981	-9.905	16.21751	-16.4424
4	10.8487	-9.8286	16.18996	-16.4438
4.1	10.3966	-9.3246	16.10958	-16.4438
4.2	9.96319	-9.5543	16.07284	-16.4465

4.3	10.1303	-9.9442	16.00854	-16.4561
4.4	10.3077	-10.49	15.9649	-16.474
4.5	10.4014	-10.827	15.93964	-16.4898
4.6	9.90576	-10.379	15.88683	-16.5104
4.7	9.37139	-9.867	15.84549	-16.5303
4.8	9.48953	-10.066	15.82712	-16.5468
4.9	9.55135	-10.411	15.76282	-16.5557
5	9.18266	-10.651	15.74215	-16.5646
5.1	8.67317	-10.322	15.7077	-16.5729
5.2	8.74998	-9.7916	15.65029	-16.5873
5.3	9.06782	-9.7404	15.59747	-16.5983
5.4	9.3436	-9.7364	15.54695	-16.6113
5.5	8.98369	-9.1534	15.53777	-16.6257
5.6	8.70974	-8.6081	15.49413	-16.6374
5.7	8.94968	-8.7302	15.41605	-16.6422
5.8	9.18815	-9.096	15.37472	-16.6477
5.9	8.84288	-9.3399	15.31731	-16.6566
6	8.55869	-8.8988	15.28056	-16.6615
6.1	8.77412	-8.5027	15.25301	-16.6862
6.2	9.30007	-8.8564	15.18641	-16.6992
6.3	9.73715	-9.16	15.15426	-16.7054
6.4	9.34799	-8.7683	15.15885	-16.7164
6.5	8.97784	-8.3517	15.10374	-16.7287
6.6	9.14975	-8.6443	15.0647	-16.7315
6.7	9.54659	-8.897	15.06929	-16.7329
6.8	9.88565	-8.9852	15.01418	-16.7535
6.9	9.54988	-8.6026	14.97743	-16.7693
7	8.99723	-9.0016	14.9338	-16.7802
7.1	8.50858	-9.2789	14.89017	-16.7919
7.2	8.67573	-9.4244	14.88787	-16.7974
7.3	8.86299	-8.9639	14.85802	-16.8214
7.4	8.37617	-8.2566	14.81438	-16.8317
7.5	7.9241	-7.5686	14.77764	-16.8496

Dari pengujian gerak *prototype* yang didapat pada hasil diatas, disimpulkan beberapa data melalui tabel berikut.

Tabel 2. Hasil dan Analisa

No	Parameter	Simple Control System		Hybrid	
		15°	-15°	15°	-15°
1	Maximum overshoot (%)	21.3%	14.9%	9.17%	13.5%
2	Error (%)	37.86%	35.94%	7.7%	3.3%
3	Settle time (s)	Tidak Tercapai	Tidak Tercapai	2 dtk	3 dtk

Berdasarkan tabel 2, ditunjukkan hasil dengan 4 pengujian yaitu pengujian *segway* sistem kontrol sederhana, pengujian *Segway* dengan ditambahkan sistem kontrol *hybrid*. didapat maksimum *overshoot* sebesar 21.3% dan 14.9%, *error* sebesar 37.86% dan 35.94% dan tidak mencapai *settle time* di kedua sudut kemiringan selama pengujian berlangsung. Sedangkan dengan kontrol *hybrid* pada kemiringan sudut 15° dan -15°, didapat *overshoot* sebesar 9.17% dan 13.5%, *error* sebesar 7.7% dan 3.3%, dan *settle time* pada masing – masing pengujian sebesar 2 detik dan 3 detik.

5. Kesimpulan

Penggunaan sistem kontrol *hybrid* belum mampu meminimalisir *overshoot* dan *error* \leq 5% pada sistem, akan tetapi telah mencapai *settle time* seminim mungkin. Dibandingkan dengan sistem kontrol sederhana, kontrol *hybrid* dapat mengurangi maksimum *overshoot*, *error* pada sistem, osilasi selama waktu pengujian dan *settle time* untuk mencapai posisi *steady state*.

- [1] S. Rafiuddin, 2015, *Rancang bangun self balancing motor sebagai moda transportasi*, Jurnal Mekanikal, Vol. 6 No. 1: Januari 2015: 522-531
- [2] Fahmizal., G. Setyawan, M. Arrofiq, A. Mayub. 2017, *Logika fuzzy pada robot inverted pendulum beroda dua*, Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIIK), Vol. 4, No. 4, pp. 247-252
- [3] H. S. Bachri M., 2004, *Sistem kendali hybrid PID-logika fuzzy pada pengaturan kecepatan motor DC*, Makara, Teknologi, Vol. 8, No. 1, pp. 25-34
- [4] R. Bimarta, A. Eko Putra., A. Dharmawan, 2015, *Balancing robot menggunakan metode kendali proporsional integral derivatif*, IJEIS, Vol. 5, No. 1, pp. 89-98.
- [5] B. Messner, D. Tilbury, R. Hill, and J. Taylor, 2011, *Control Tutorials for Matlab and Simulink – Inverted Pendulum : System Modeling*, University of Michigan.
- [6] Gunterus, Frans. 1994, *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Dasar*, Jakarta: PT Elex Media Komputindo, Jakarta.
- [7] F. Wahab, A. Sumardiono, A. R. A. Tahtawi, A. F. A. Mulyari, 2017, *Desain dan purwarupa fuzzy logic control untuk pengendalian suhu ruangan*, Jurnal Teknologi Rekayasa. Vol. 2, No. 1, pp. 1-8.



I Made Mahatma Tantra Nagendra menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, pada tahun 2021, Bidang konsentrasi yang diminati adalah rekayasa manufaktur.

Topik yang diangkat dalam tugas akhir/ skripsi berupa perancangan robotika berupa Segway dengan sistem kontrol hybrid.