

Sistem Kontrol pada Automated Guided Vehicle Beroda Mecanum Menggunakan Sliding Mode Controller

Muhammad Faiz, Bambang Sumantri, dan Bima Sena Bayu Dewantara
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: muhammadfaiz@pascasarjana.student.pens.ac.id

Abstrak—Proses produksi pada industri tidak terlepas dari distribusi barang. Dalam perkembangannya, distribusi barang telah menggunakan robot tanpa awak yaitu *Automated Guided Vehicle (AGV)*. Dalam prakteknya, AGV menghadapi lingkungan yang tidak linier dan kompleksitas tinggi. Hal ini menjadi pertimbangan diterapkannya *robust control Sliding Mode Control (SMC)* yang merupakan salah satu metode dengan kemampuan dalam menghadapi gangguan dan ketidaklinieran yang tinggi. Namun, SMC memiliki kekurangan yaitu adanya *chattering* yang berakibat adanya vibrasi pada motor yang pada akhirnya dapat merusak motor. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi *chattering* pada SMC, serta meningkatkan performa kontrol dengan menggunakan modifikasi fungsi signum pada SMC menjadi fungsi saturasi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *Robot Operating System (ROS)*, *V-Rep* dan mikrokontroler. Mikrokontroler bertindak sebagai pengolah algoritma sistem. Lebih lanjut, fungsi saturasi mampu mengurangi *rise time* sebesar 30%, *overshoot* 16 %, dan *RMSE* sebesar 0,21%.

Kata kunci: *V-Rep, automated guided vehicle, robot operating system, sliding mode kontrol, robust control*

Abstract—The production in industry, are involving distribution to transport the goods. Recently, distribution activities are using unmanned vehicle, that is *Automated Guided Vehicle (AGV)*. In real condition, AGV are facing environment with complexity of high uncertainty and nonlinearity. Because of this, robust control method could be considered to be used to improve the control performance. For instance, *Sliding Mode Control* has good robustness to the uncertainty of the system and disturbances. However, the *chattering* phenomenon is one of the major issues of the sliding mode control. This phenomenon could damage the motor. This research aim to reduce *chattering* and improve the control performance, with modifying signum function to saturation function. This research are using *ROS*, *V-Rep* and microcontroller. Microcontroller for processing algorithm and another function. Moreover, saturation function had successfully reducing *rise time* about 30%, *overshoot* 16% and *RMSE* 0.21%.

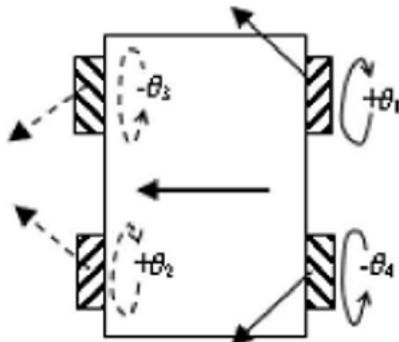
Keywords: *V-Rep, automated guided vehicle, robot operating system, sliding mode kontrol, robust control*

I. PENDAHULUAN

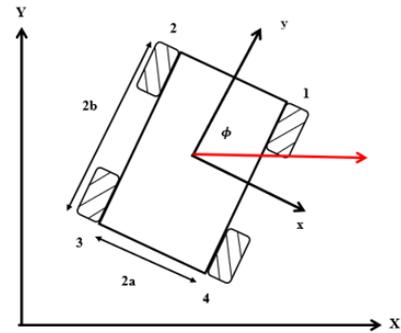
Berbicara tentang produksi di industri, tidak terlepas dari pendistribusian barang ke beberapa tempat. Pendistribusian barang di industri tak lain juga berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja. Kecelakaan kerja dapat disebabkan faktor-faktor lain, seperti kelalaian yang diakibatkan kejenuhan, kelelahan dan sebagainya. Seiring dengan perkembangan zaman, pendistribusian barang pada lingkup industri, melibatkan *unmanned vehicle*. *Automated Guided Vehicles (AGV)* adalah salah satu contoh kategori *unmanned vehicle* dan sering dilibatkan dalam proses distribusi barang di industri. AGV juga membantu kegiatan manusia dalam mengurangi cedera akibat pekerjaan monoton terus menerus, serta berperan dalam pemindahan barang dengan berat barang diluar kemampuan manusia. Lebih lanjut, AGV juga berperan dalam proses *assembly line* dan *production line*. Jenis AGV dibedakan menjadi beberapa macam berdasarkan

navigasinya [1], yaitu: *Wire Guided Vehicle (WGV)*, *magnet guided vehicle*, dan *gyro guided vehicle*. Sistem navigasi AGV paling banyak digunakan adalah penggunaan kabel benam lantai (*WGV*) [2]. Penggunaan AGV pada dasarnya adalah dengan cara diberikan titik awal dan titik akhir untuk pengantaran barang, dan oleh karenanya, diperlukan kemampuan *trajectory tracking*. Dalam mobilitas pergerakannya, beban yang diberikan pada AGV dapat bervariasi, sehingga untuk menjamin stabilitas pergerakannya dan kondisi yang tidak pasti ini maka diperlukan sistem kontrol yang handal [3]. Beberapa metode digunakan untuk melakukan *trajectory control*, seperti *PID*, *fuzzy*, *backstepping*, *adaptive control*, serta *disturbance observer* [4]-[8].

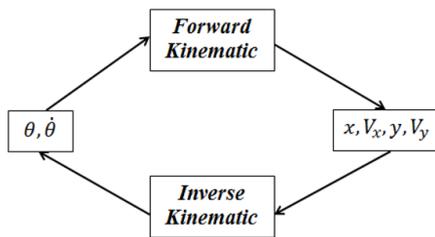
Sliding Mode Control (SMC) dinisbatkan sebagai salah satu metode *robust control* dengan kemampuan tinggi dalam menghadapi gangguan dari luar dan dinamika yang berubah-ubah [9]. Selain itu, SMC memiliki performa dan *robustness* yang baik ketika dihadapkan dengan parameter



Gambar 1. Arah gaya yang dihasilkan oleh putaran roda [17]



Gambar 3. Diagram badan robot AGV



Gambar 2. Forward kinematic dan inverse kinematic

Tabel 1. Konfigurasi arah putar roda dan arah AGV

Arah	Roda ke-			
	1	2	3	4
Utara	+	+	+	+
Selatan	-	-	-	-
Timur	0	0	0	0
Barat	0	0	0	0
Timur laut	0	+	0	+
Barat daya	0	-	0	-
Barat laut	+	0	+	0
Tenggara	-	0	-	0

yang tidak linier dengan gangguan internal dan eksternal [10]-[11]. Lebih lanjut, pada permasalahan atau kontrol *path following*, dan *motion control*, penggunaan SMC membantu robot dalam mengikuti *target path* dengan baik dan *smooth* [12]-[13]. Namun, metode kontrol menggunakan SMC memiliki permasalahan klasik, yaitu fungsi diskontinuitas yang menghasilkan *chattering* pada *input* kontrol, berefek pada motor dan menghasilkan vibrasi ketika sistem beroperasi. Ada beberapa metode (yang telah lalu) diajukan guna mengurangi efek *chattering* seperti pada [3] yaitu *adaptive control*, atau pada [14]-[15] dengan SMC orde tinggi.

Berdasarkan permasalahan yang tersebut di atas, penelitian ini ditujukan untuk melakukan desain dan implementasi kontrol SMC pada AGV dengan memodifikasi fungsi signum pada SMC. Metode ini sebelumnya telah diaplikasikan pada *drone* dan berhasil mengurangi *chattering*, yang diikuti dengan meningkatnya efisiensi energi yang digunakan [16]. Lebih lanjut, modifikasi signum menjadi fungsi saturasi diuji pada AGV.

II. PERANCANGAN SISTEM AGV

A. Desain Platform AGV

Penelitian ini menggunakan roda berjenis *mecanum wheel* (selanjutnya disebut roda mecanum). Roda mecanum memungkinkan robot bergerak ke segala arah dengan beberapa pengaturan. Arah gaya yang dihasilkan oleh roda mecanum dapat dilihat pada Gambar 1.

AGV dapat menjangkau ke-8 arah mata angin dengan kombinasi pengaturan ke-4 roda. Pengaturan roda dan arah yang dihasilkan ditampilkan pada Tabel 1. Simbol positif adalah putaran roda searah jarum jam, simbol negatif merupakan kebalikannya, dan nol adalah roda tidak berputar.

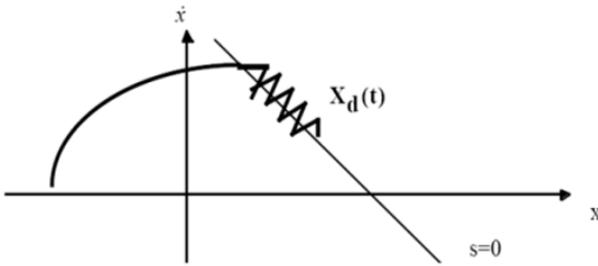
B. Pemodelan Sistem AGV

Pergerakan AGV sejatinya merupakan hasil dari rotasi motor. Dalam praktiknya, AGV diberikan koordinat untuk titik awal dan titik akhir untuk pergerakannya. Bukan seberapa banyak atau cepat rotasi motor. Oleh karenanya, diperlukan transformasi dari koordinat kartesian menuju putaran motor (ruang sendi) dan sebaliknya. Transformasi ini dikenal dengan sebutan pemodelan kinematic seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 3 menyediakan informasi berupa sumbu lokal badan AGV dengan huruf “x” dan “y”, sumbu global disimbolkan dengan huruf “X” dan “Y”, sudut yang dibentuk oleh sumbu lokal badan AGV dengan sumbu global ditandai dengan simbol “ ϕ ”, serta nomor roda dari kanan atas berlawanan jarum jam dimulai dengan nomor 1. Model dinamik ditunjukkan pada (1)-(4)

$$J\ddot{O} = \Sigma F \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \Sigma F. \tag{2}$$



Gambar 4. Chattering phenomenon [19]

Kemudian melakukan rotasi dengan menggunakan matriks rotasi, ditampilkan (3)-(4).

$$J\ddot{O} = R(\phi)\Sigma F \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Sigma F \tag{4}$$

dimana:

- m = Massa robot (kg)
- I = Inersia robot (kgm²)
- \ddot{X} = Percepatan robot pada sumbu X global (m/s²)
- \ddot{Y} = Percepatan robot pada sumbu Y global (m/s²)
- $\ddot{\phi}$ = Percepatan angular robot (rad/s²).

Dalam penelitian ini, massa robot yang digunakan adalah 0,3 kg dan besar inersia robot adalah 0,08112 . Seperti yang disebut sebelumnya, pemodelan kinematik dibutuhkan untuk merubah dari ruang sendi ke ruang kartesian dan sebaliknya. Kinematik maju ditampilkan pada (5), dan kinematik invers ditampilkan pada (6),

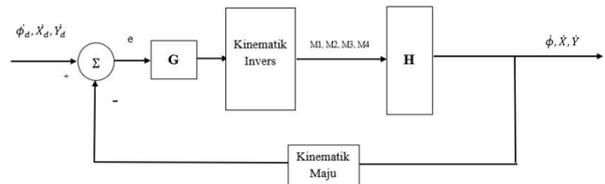
$$F = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & -0,5 & 0,5 & -0,5 \\ \frac{a+b}{2} & \frac{-a-b}{2} & \frac{-a-b}{2} & \frac{a+b}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Dengan a bernilai 0,34 meter dan b bernilai 0,14 meter, maka didapat kinematik invers:

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1,0417 \\ 0,5 & -0,5 & -1,0417 \\ 0,5 & 0,5 & -1,0417 \\ 0,5 & -0,5 & 1,0417 \end{bmatrix} F \tag{6}$$

dimana:

- $M1$ = Kecepatan putar motor 1 (rad/s)
- $M2$ = Kecepatan putar motor 2 (rad/s)
- $M3$ = Kecepatan putar motor 3 (rad/s)
- $M4$ = Kecepatan putar motor 4 (rad/s).



Gambar 5. Diagram kontrol AGV

C. Perancangan Sistem Kontrol

SMC diperkenalkan sekitar awal tahun 1960-an atau 1950-an akhir. Pada prinsipnya, SMC melakukan kendali pada permukaan yang telah didesain, biasa disebut dengan *sliding surface*, dengan melakukan *switching*. Hal ini yang mengakibatkan adanya *chattering* [18]. *Chattering* merupakan osilasi dengan frekuensi tinggi yang terjadi pada input kontrol. *Chattering* mengakibatkan rendahnya akurasi, serta berakibat pada sistem mekanis aktuator. Gambar 4 merupakan *chattering phenomenon*.

Berikut ditampilkan (Gambar 5) diagram kontrol AGV secara garis besar. *Input* atau *setpoint* berupa kecepatan sumbu x , dan y global, serta kecepatan sudut *heading global*.

Gambar 5 menyediakan informasi yang terdiri atas blok-blok, masukan serta keluaran. Blok pertama adalah blok kontrol yaitu blok kontrol SMC. Blok kedua adalah kinematik invers, blok ketiga adalah AGV dan blok terakhir yang berada pada umpan balik adalah kinematik maju. Berikut merupakan penjelasan rinci blok-blok tersebut di atas.

SMC merupakan metode atau algoritma kontrol yang berbasis model (*model based*). Sebelum melakukan perancangan kontrol SMC, maka dilakukan pemodelan dari sistem yang akan dikontrol.

Kemudian, mendesain kontrol SMC dari pemodelan dinamik di atas. Ide daripada SMC merupakan penyederhanaan masalah orde tinggi (orde ke- n) yang kemudian dibawa menuju orde ke-1. SMC memiliki *sliding surface* dengan berbasis waktu, ditampilkan pada (7).

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \tag{7}$$

Dengan λ variabel konstan bernilai positif, merupakan vektor error, serta n merupakan orde dari sistem. Didapat *sliding surface* dan *derivative sliding surface*, ditulis pada (8)-(9):

$$s = e \tag{8}$$

$$\dot{s} = \dot{e} \tag{9}$$

dengan e adalah merupakan vektor *error*, dan turunannya, didapat:

$$e = v_d - v \tag{10}$$

$$\dot{e} = \dot{v}_d - \dot{v} \tag{11}$$

dimana $v_d = [\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{\phi}_d]^T$ merupakan *input* kecepatan atau

Tabel 2. Perangkat penunjang pengujian

No	Nama	Varian atau spesifikasi
1.	Processor	Intel Core i7-4700HQ
2.	Sistem Operasi	Ubuntu 18.04 LTS
3.	Graphic Card	NVIDIA GEFORCE 745M 2GB
4.	RAM	8GB DDR3
5.	V-Rep	V-Rep 3.5.0
6.	Mikrokontroler	Arduino AT-Mega 2560
7.	Library	V-Rep Remote API
8.	ROS	ROS Melodic

desired velocity, dari sistem AGV, dan $v = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ adalah kecepatan aktual atau *output* aktual dari AGV pada sumbu x dan y global serta kecepatan angular sumbu z global.

Target dari sistem kontrol adalah membuat *error* menjadi nol ($e = 0$), sehingga:

$$s = 0 \tag{12}$$

$$v_d - v = 0 \tag{13}$$

substitusi (3) ke (14)

$$\dot{v}_d - (\mathbf{R}(\phi) \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{O}} F) = 0. \tag{15}$$

Keluaran SMC merupakan modifikasi dengan cara menjumlahkan sistem dinamik dan kontrol SMC, sebagai berikut:

$$F = u_{eq} + u_{smc} \tag{16}$$

dari (15), didapat:

$$u_{eq} = (\mathbf{R}(\phi)^{-1} \mathbf{J})(\dot{v}_d). \tag{17}$$

Kemudian kontrol SMC dirancang sebagai berikut:

$$u_{smc} = ks + \beta \text{sign}(s). \tag{18}$$

Total keluaran yang telah dimodifikasi yaitu substitusi (15)-(16) ke (14)), menjadi:

$$F = (\mathbf{R}(\phi)^{-1} \mathbf{J})(\dot{v}_d) + ks + \beta \text{sign}(s) \tag{19}$$

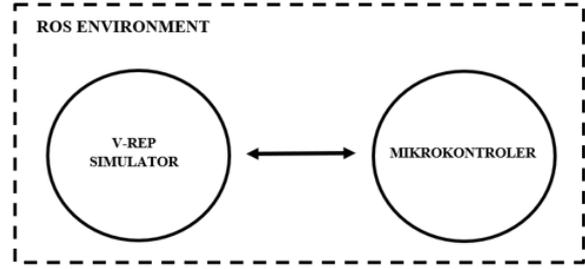
$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases} \tag{20}$$

dengan k, β merupakan variabel konstanta bernilai positif.

III. PERANCANGAN SISTEM SIMULASI

Untuk mengetahui performa dari sistem kontrol yang dirancang pada (19), dilakukan pengujian dilakukan dengan bantuan *software Robot Operating System (ROS)*, dan V-rep. Sistem operasi beserta spesifikasi laptop dan perangkat mikrokontroler untuk digunakan pada pengujian, ditunjukkan bersama pada Tabel 2.

Gambar 6 menyediakan informasi diagram sistem secara keseluruhan. Di dalam lingkungan ROS, terdapat



Gambar 6. Diagram sistem keseluruhan

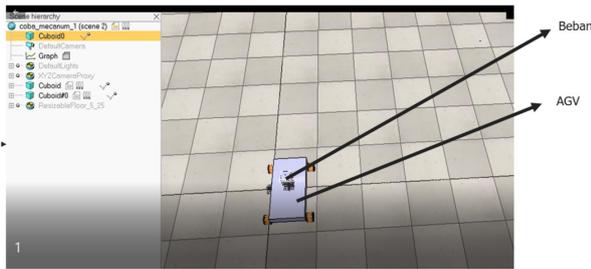
dua *nodes* (selanjutnya disebut titik). Titik-titik ini berjalan masing-masing secara independen. Kedua titik dapat berbagi informasi satu dengan lainnya.

Mikrokontroler sebagai tempat untuk menjalankan fungsi-fungsi pada algoritma SMC. Pada prinsipnya, fungsi algoritma dapat dilakukan pada satu *device* atau dapat dijalankan pada satu titik sekaligus, yaitu pada titik simulator V-Rep saja, tanpa menggunakan ROS, maupun mikrokontroler. Namun, untuk mendekati keadaan sesungguhnya (yang pada riilnya) menggunakan mikrokontroler sebagai pemroses algoritma dan juga mengolah fungsi-fungsi lain (termasuk juga kinematik invers), maka diterapkan mikrokontroler untuk sistem ini. Mikrokontroler mendapat informasi dari simulator V-Rep berupa kecepatan AGV dan arah hadap. Kemudian keluaran mikrokontroler yang menuju simulator V-Rep adalah berupa kecepatan masing-masing roda.

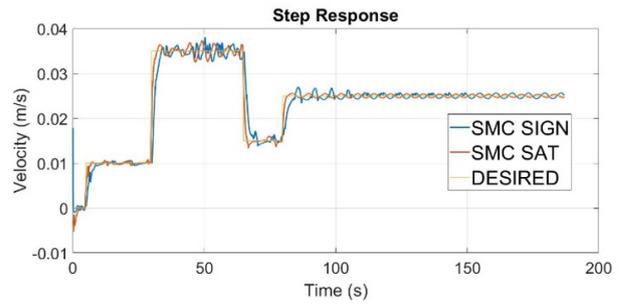
Sementara itu, simulator V-Rep berfungsi untuk menjalankan fungsi-fungsi AGV yang awalnya berada pada dunia riil, kemudian dibawa ke dunia virtual. Fungsi-fungsi AGV antara lain berupa pergerakan roda mecanum. Kecepatan masing-masing roda didapat dari mikrokontroler dan kemudian didapat kecepatan pada masing-masing sumbu kartesian. Kecepatan pada masing-masing sumbu digunakan sebagai *input* algoritma SMC pada mikrokontroler. Sistem pengujian ini dikenal sebagai *Hardware in The Loop (HITL)*.

Pengujian bertujuan untuk mengetahui performa kontroler (SMC) ketika dihadapkan dengan perubahan beban. Beban berupa kubus dengan massa bervariasi dari 0,1 kg, dan 1 kg. Dengan sudut arah hadap awal adalah 90 derajat ($^{\circ}$) dan kecepatan awal 0 m/s. Sementara itu, AGV memiliki dimensi panjang 0,68 meter dan lebar 0,28 meter. Hal ini disesuaikan dengan dimensi riilnya. Lingkungan pengujian dan wujud AGV pada V-Rep dapat dilihat pada Gambar 7.

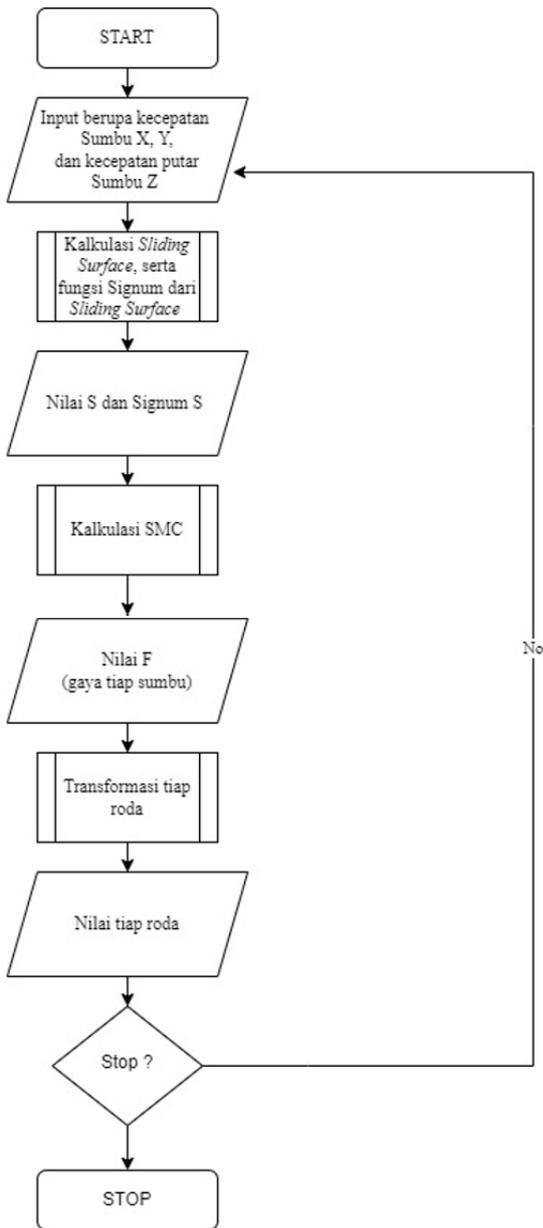
Robot yang digunakan dalam pengujian ini yaitu robot mecanum 4 roda. Robot didesain sedemikian rupa mirip dengan yang ada di riilnya. Parameter massa robot yaitu berkisar 0,3 kg pada simulator V-Rep. Robot mecanum ini berjalan pada lingkungan berdimensi 6,4 x 9,1 meter. Sementara itu, robot bergerak dengan diberikan *input* berupa step dengan tidak merubah arah hadap. Tujuan diberikan *input* step tidak lain adalah untuk mengetahui performa kontrol, yaitu salah satunya adalah ada atau tidaknya osilasi, serta *error* yang dihasilkan. Diagram alir sistem ditunjukkan pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 7. Lingkungan pengujian



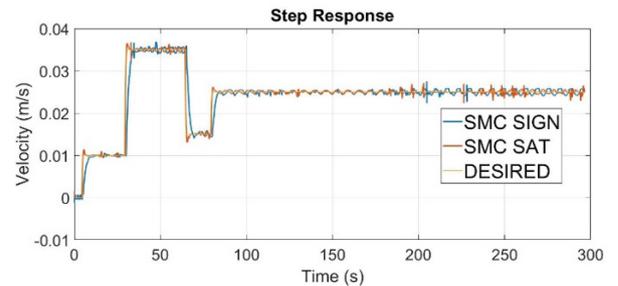
Gambar 9. Kecepatan pada sumbu x global dengan pembebanan 1N



Gambar 8. Diagram alir sistem

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan cara memberi masukan kecepatan berupa step. Masukan kecepatan berupa kecepatan pada sumbu x global (dengan kecepatan sumbu y dan kecepatan angular sudut adalah nol) dan sumbu y



Gambar 10. Kecepatan pada sumbu y global dengan pembebanan 1N

global (dengan kecepatan sumbu y dan kecepatan angular sudut adalah nol). Kemudian masing-masing diuji dengan dua pembebanan berbeda. Sehingga terdapat empat data yang akan dianalisa performa kontrolnya

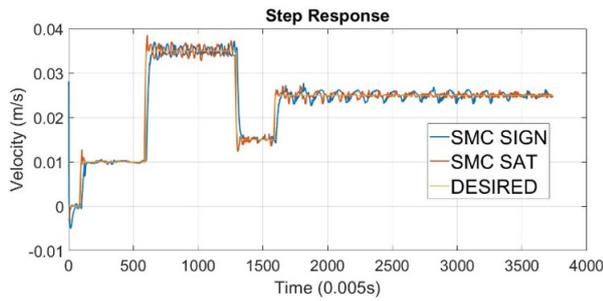
A. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa dari kontrol yang digunakan. Parameter performa antara lain adalah sebagai berikut:

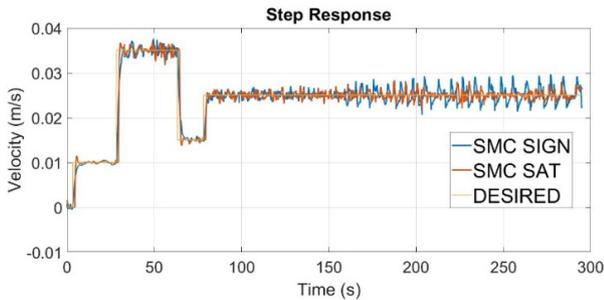
1. Rise time
Rise time adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai *setpoint*
2. Settling time
Lama waktu sistem untuk mencapai kestabilan
3. Peak time
Lama waktu mencapai puncak
4. Overshoot
Selisih antara nilai puncak pertama kali dengan *setpoint*
5. RMSE
Akar kuadrat rata-rata error
6. Average steady state error
Nilai rerata error ketika mencapai kestabilan
7. Average deviation
Merupakan simpangan rata-rata. Hal ini juga menunjukkan seberapa besar *chattering* yang terjadi.

Hasil pengujian AGV dengan *input* berupa kecepatan pada sumbu x global dan sumbu y global dengan pembebanan dengan berat 1 N ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Sedangkan, hasil pengujian AGV dengan *input* berupa kecepatan pada sumbu x global dan sumbu y global dengan pembebanan dengan berat 10 N ditampilkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Kecepatan pada sumbu x global dengan pembebanan 10N



Gambar 12. Kecepatan pada sumbu y global dengan pembebanan 10N

B. Pembahasan

SMC SAT yang ditunjukkan pada Gambar 9 sampai Gambar 12 merupakan modifikasi dari (19) menjadi :

$$F = \left(R(\phi)^{-1} J \right) \left(\dot{v}_d \right) + ks + \beta sat(s) \quad (21)$$

dengan fungsi $sat(\cdot)$ adalah :

$$sat(s) = \begin{cases} sign(s) & |s| > \zeta \\ \frac{s}{\zeta} & |s| \leq \zeta \end{cases} \quad (22)$$

ζ merupakan variabel konstanta bernilai positif. Alasan menggunakan fungsi saturasi adalah dapat memberi *boundary* pada keluaran. Terlihat pada fungsi saturasi persamaan (22), bila *sliding surface* bernilai di atas nilai ζ , maka fungsi signum akan berperan. Namun ketika di bawah atau sama dengan nilai ζ , nilai *sliding surface* akan dibagi dengan nilai ζ . Hal ini menandakan bahwa, semakin dekat atau semakin kecil *sliding surface*, maka keluaran akan semakin kecil. Ini berakibat pada berkurangnya *chattering*. Lebih lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 13.

1. Analisa Kestabilan

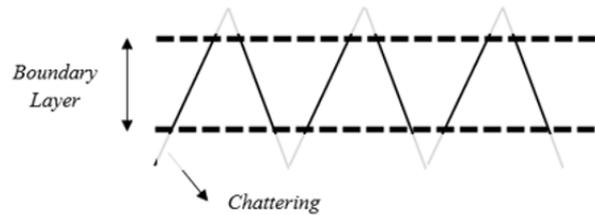
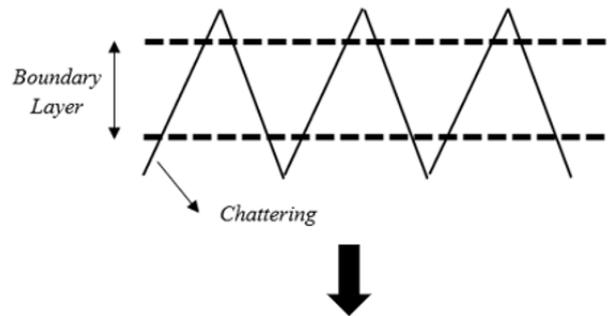
Analisa kestabilan menggunakan kestabilan Lyapunov, diberikan fungsi:

$$V = 0.5s^2. \quad (23)$$

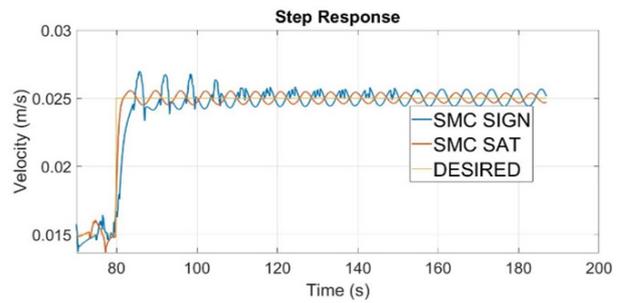
Melakukan operasi *derivative* pada (23), sehingga dihasilkan:

$$\dot{V} = s(-ks - \beta sat(s)). \quad (24)$$

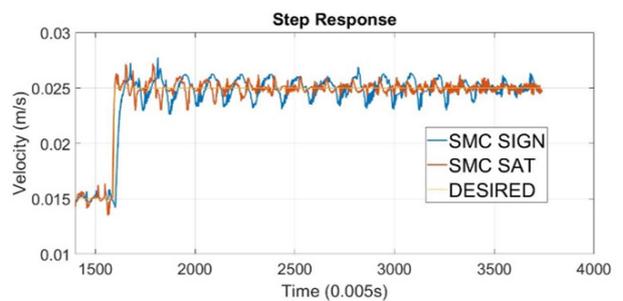
Asumsi gangguan dari internal dan eksternal dengan d , dapat bernilai positif maupun negatif, maka:



Gambar 13. Efek *boundary layer* terhadap *chattering*



Gambar 14. Kecepatan x global beban 1 N pada waktu 70 detik



Gambar 15. Kecepatan x global beban 10 N pada waktu 70 detik

$$\dot{V} = s(-ks - \beta sat(s) - d) \quad (25)$$

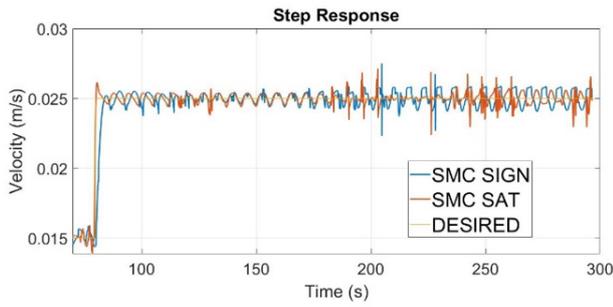
$k > 0$ dan $\beta > d$, V adalah *negative definite*, maka sistem dapat dinyatakan stabil.

2. Analisa Performa Kontrol

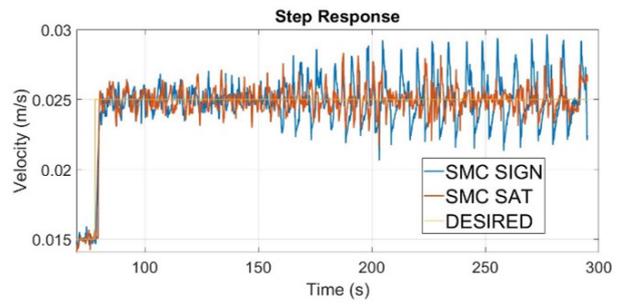
Performa kontrol diambil dari hasil percobaan yang ada pada Gambar 9 sampai Gambar 12. Namun, hanya pada waktu di atas 70 detik. Lebih lanjut perhatikan Gambar 14 – Gambar 17.

Tabel 3 menunjukkan performa kontrol pada sumbu x dengan pembebanan berbeda-beda. Tulisan bercetak tebal adalah nilai terbaik yang diperoleh sistem.

Kemudian, Tabel 4 menampilkan performa kontrol pada sumbu y dengan pembebanan berbeda-beda.



Gambar 16. Kecepatan y global beban 1 N pada waktu 70 detik



Gambar 17. Kecepatan y global beban 10 N pada waktu 70 detik

Tabel 3. Performa kontrol pada sumbu x global dengan pembebanan 1N

	Beban 1 N		Beban 10 N	
	SMC SIGN	SMC SAT	SMC SIGN	SMC SAT
Rise Time (s)	3,9897	1,1066	1,2071	0,3782
Settling Time (s)	120,2868	118,9413	118,9042	120,5871
Peak Time (s)	6,65	11,45	11,05	10,45
Overshoot (%)	8,4164	3,1166	12,8394	10,2822
RMSE	0,1528	0,0244	0,0258	0,1549
Average Steady State Error	0,6125	0,6396	1,0443	0,4911
Average Deviation	0,00056	0,000335	0,000527	0,00031

Tabel 4. Performa kontrol pada sumbu y global dengan pembebanan 1N

	Beban 1 N		Beban 10 N	
	SMC SIGN	SMC SAT	SMC SIGN	SMC SAT
Rise Time (s)	2,5526	0,540	1,0117	0,6385
Settling Time (s)	216,5903	217,1011	216,682	215,765
Peak Time (s)	124,9	123,85	199	108,35
Overshoot (%)	9,6995	8,9204	32,45	7,8403
RMSE	0,26216	0,19597	0,033744	0,028528
Average Steady State Error	0,000467	0,00030771	0,001	0,0006437
Average Deviation	0,000472	0,000311	0,00107	0,000858

Modifikasi fungsi signum (*sign*) menjadi saturasi (*sat*) terlihat sangat menonjol terutama pada rerata *rise time*, *overshoot*, dan RMSE. Rerata *rise time* dengan fungsi signum memiliki 2,2476 detik di sumbu *x*, dan 2,2093 di sumbu *y*. Sementara itu, fungsi saturasi memiliki rerata *rise time* dengan 1,5664 detik di sumbu *x* dan 0,6022 detik di sumbu *y*.

Rerata *overshoot* dengan fungsi signum memiliki 12,843% pada sumbu *x*, dan 16,98% pada sumbu *y*. Sementara itu, fungsi saturasi memiliki rerata *overshoot* 10,785% pada sumbu *x* dan 7,5138% pada sumbu *y*.

Rerata RMSE dengan fungsi signum memiliki 0,1109 pada sumbu *x*, dan 0,1837 pada sumbu *y*. Sementara itu, fungsi saturasi memiliki rerata RMSE 0,1112 pada sumbu

Tabel 5. Rerata performa kontrol pada sumbu x global

	SMC SIGN	SMC SAT
Rise Time (s)	2,2476	1,5664
Settling Time (s)	142,06	142,07
Peak Time (s)	50,233	51,867
Overshoot (%)	12,843	10,785
RMSE	0,1109	0,1112
Average Steady State Error	0,7906	0,5372
Average Deviation	0,0005435	0,0003225

Tabel 6. Rerata performa kontrol pada sumbu y global

	SMC SIGN	SMC SAT
Rise Time (s)	2,2093	0,6022
Settling Time (s)	218,14	217,71
Peak Time (s)	149,62	118,68
Overshoot (%)	16,98	7,5138
RMSE	0,1837	0,0815
Average Steady State Error	0,0006	0,0004
Average Deviation	0,000771	0,0005845

x dan 0,0815 pada sumbu *y*, kemudian untuk rerata deviasi fungsi signum adalah 0,0005435 pada sumbu *x*, 0,000771 pada sumbu *y*, fungsi saturasi memiliki rerata 0,0003225 pada sumbu *x*, serta 0,0005845 pada sumbu *y*. Lebih lanjut dapat dilihat pada Tabel 5 – Tabel 6.

V. KESIMPULAN

Sistem kontrol SMC dirancang dan diterapkan untuk mengontrol pergerakan AGV dengan roda mecanum. Pada penelitian ini kami melakukan modifikasi SMC dari fungsi signum menjadi fungsi saturasi. Pengujian kontrol AGV menggunakan SMC dengan modifikasi dari fungsi signum menjadi saturasi dapat dapat mengurangi *chattering*. Dibuktikan dengan rerata deviasi yaitu 59,33% lebih kecil dari fungsi signum pada sumbu *x* global, juga 75,81% lebih kecil dari fungsi signum pada sumbu *y* global. Lebih lanjut, dilihat dari *Average Steady State error*, dan RMSE.

Serta, fungsi saturasi mampu mengurangi (rerata) *rise time* sebesar 30% pada sumbu *x* global, dan 72% pada sumbu *y* global, *overshoot* sebesar 16% pada sumbu *x* global, dan 55 % pada sumbu *y* global, serta RMSE sebesar 0,21% pada sumbu *x* global dan 55% pada sumbu *y* global.

REFERENSI

- [1] J. Kim, H. Cho, and S. Kim, 'Positioning and driving control of fork-type automatic guided vehicle with laser navigation', *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 13, no. 4, pp.307-314, 2013.
- [2] H. Barberá and D. Herrero-Perez, 'Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, No. 4, pp. 296–311, 2010.
- [3] I. Matraji, A. Al-Durra, A. Haryono, K. Al-Wahedi, and M. Abou-Khousa, 'Trajectory tracking control of skid-steered mobile robot based on adaptive second order sliding mode control', *Control Engineering Practice*, vol. 72, pp. 167–176, 2018.
- [4] P. Zhang and Z. Wang, 'Improvements of direct current motor control and motion trajectory algorithm development for automated guided vehicle', *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 1-12, 2019.
- [5] B. Wen, Z. Gao, B. Gao, Z. Qin, Y. Du, and H. Li, 'Research on trajectory tracking control method of omnidirectional moving platform based on backstepping', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1828, no. 1, pp. 012141, 2021.
- [6] N. Vu, L. Ong, N. Trinh, and S. Pham, 'Robust adaptive controller for wheel mobile robot with disturbances and wheel slips', *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 336-346, 2021.
- [7] H. Yin, Y.-H. Chen, and Y. U. Dejie, 'Controlling an underactuated two-wheeled mobile robot: A constraint-following approach', *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 141, no. 7, 2019.
- [8] S. Wang and J. Zhai, 'A Trajectory tracking method for wheeled mobile robots based on disturbance observer', *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2165–2169, 2020.
- [9] V. I. Utkin and H.-C. Chang, 'Sliding mode control on electro-mechanical systems', *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 8, no. 4–5, pp. 451–473, 2002.
- [10] W. Gao and J. C. Hung, 'Variable structure control of nonlinear systems: a new approach', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 45–55, 1993.
- [11] P. S. Thakar, B. Bandyopadhyay, and P. Gandhi, 'Improved output-feedback second order sliding mode control design with implementation for underactuated slosh-container system having confined track length', *IET Control Theory & Applications*, vol. 11, no. 8, pp. 1316–1323, 2017.
- [12] D. Soudbakhsh and A. Eskandarian, 'Comparison of linear and non-linear controllers for active steering of vehicles in evasive manoeuvres', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 226, no. 2, pp. 215–232, 2011.
- [13] Z. Sun, J. Zheng, Z. Man, M. Fu, and R. Lu, 'Nested adaptive super-twisting sliding mode control design for a vehicle steer-by-wire system', *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 122, no.3, pp. 658–672, 2019.
- [14] J. P. Mishra, Q. Xu, X. Yu, and M. Jalili, 'Precision position tracking for piezoelectric-driven motion system using continuous third-order sliding mode control', *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1521–1531, 2018.
- [15] J. Li and Q. Zhang, 'A linear switching function approach to sliding mode control and observation of descriptor systems', *Automatica*, vol. 95, pp. 112–121, 2018.
- [16] B. Sumantri, N. Uchiyama, and S. Sano, 'Least square based sliding mode control for a quad-rotor helicopter and energy saving by chattering reduction', *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 66, pp. 769-784, 2015.
- [17] M. De Ryck, M. Versteyhe, and F. Debrouwere, 'Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques', *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 152–173, 2020.
- [18] X. Yu, Y. Feng, and Z. Man, 'Terminal sliding mode control - an overview', *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp. 36–52, 2020.
- [19] W. Perruquetti and J. P. Barbot, *Sliding Mode Control In Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.