

# Perancangan Pengendali Proportional-Integral Anti-Windup (Pi-Aw) pada Simulator Mobil Listrik untuk Kendali Kecepatan dan Torsi

Adnan Rafi Al Tahtawi  
Program Studi Teknik Komputer  
Politeknik Sukabumi  
Jl. Babakan Sirna No. 25 Sukabumi  
Jawa Barat, INDONESIA  
e-mail: adnanrafialt@gmail.com

Arief Syaichu Rohman  
Lab. Sistem Kendali dan Komputer  
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha No.10 Bandung, INDONESIA  
e-mail: arief@stei.itb.ac.id

**Abstrak**— Pengendali Proportional-Integral (PI) akan dirancang pada simulator mobil listrik untuk sistem kendali kecepatan dan torsi. Komponen utama dari simulator ini adalah dua buah motor arus searah (MAS) yang terhubung sumbu putarnya. Sistem kendali kecepatan dirancang untuk MAS 1 yang merepresentasikan mobil listrik, sedangkan sistem kendali torsi dirancang untuk MAS 2 yang merepresentasikan beban. Pengendali PI dirancang dalam tiga skema, yaitu: PI linier, PI saturasi dan PI anti-windup (PI-AW). Hasil simulasi menunjukkan bahwa skema PI-AW mampu menghasilkan respon terbaik untuk kecepatan dan torsi dengan sinyal kendali yang dihasilkan tidak melebihi batas saturasi.

**Keywords**— pengendali PI; anti-windup; simulator mobil listrik; kecepatan; torsi.

**Abstract**—Proportional-Integral (PI) controller will be designed on electric car simulator for speed and torque control systems. The main components of this simulator are two direct current motors (DCMs) with a linked axis of rotation. Speed and torque control systems are designed for DCM 1 and DCM 2 which are represents the electric car and its load. PI controller is designed in three schemes: linear PI, PI with saturation and PI with anti-windup (PI-AW). The simulation result shows

*that the PI-AW scheme produces the best responses for speed and torque with control signals generated doesn't exceed the saturation limit.*

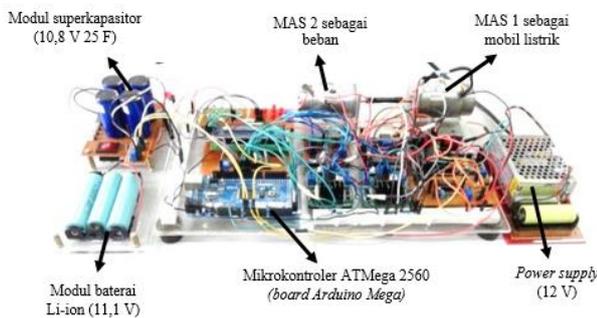
**Keywords:** PI controller, anti-windup, electric car simulator, speed, torque

## I. PENDAHULUAN

Saat ini penelitian terkait mobil listrik masih terus dilakukan untuk dijadikan sebagai solusi bagi permasalahan polusi udara. Seperti diketahui bahwa mobil listrik mampu mengurangi pencemaran udara karena energi yang digunakan tidak menghasilkan emisi. Salah satu permasalahan yang masih terus diteliti adalah penggunaan sumber energi listrik yang masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu penelitian terkait penggunaan sumber energi listrik tersebut masih perlu dikembangkan. Laboratorium di University of Pennsylvania yang bernama mLAB telah mengembangkan simulator mobil listrik dalam skala kecil dengan menggunakan motor arus searah (MAS) sebagai komponen utamanya yang dikenal dengan sebutan Protodrive [1]-[4]. Dua buah MAS tersebut dihubungkan sumbu putarnya. MAS 1 diasumsikan sebagai motor listrik pada mobil listrik, sedangkan MAS 2 diasumsikan sebagai beban yang diterima seperti permukaan jalan,

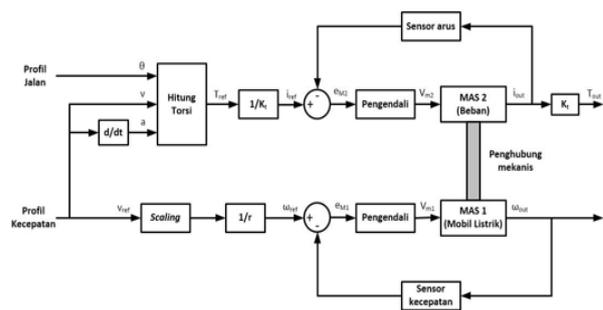
cuaca, kemacetan, dsb. Simulator tersebut dapat mensimulasikan aliran daya yang terjadi pada mobil listrik sesuai dengan kondisi sebenarnya. Dengan adanya simulator tersebut penelitian terkait penggunaan energi listrik pada mobil listrik dapat dilakukan dengan lebih mudah.

Selain itu pada [5] dan [6] juga telah dirancang ulang simulator tersebut dengan konfigurasi perangkat keras yang berbeda. Simulator yang dibangun mampu mensimulasikan proses pengisian energi pada superkapasitor saat pengereman regeneratif terjadi, sehingga energi yang terbuang saat pengereman regeneratif dapat diisikan ke superkapasitor yang memiliki karakter pengisian lebih cepat daripada baterai.



Gambar 1. Perangkat keras simulator [5] [6]

Terdapat dua jenis algoritma yang digunakan untuk mengoperasikan simulator tersebut. Pertama, tegangan yang diperlukan untuk kedua MAS dihitung berdasarkan masukan kecepatan, percepatan dan sudut kemiringan jalan. Algoritma tersebut telah diterapkan pada [5] dan [6]. Kedua, tegangan untuk MAS 1 dan arus untuk MAS 2 dihitung berdasarkan masukan kecepatan, percepatan dan sudut kemiringan jalan [3]. Tegangan pada MAS 1 merepresentasikan kecepatan yang diperlukan, sedangkan arus pada MAS 2 merepresentasikan torsi beban yang diberikan. Agar dapat diterapkan, algoritma kedua memerlukan skema sistem kendali [3]. Skema sistem kendali tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pengendali yang diusulkan

Torsi referensi diperoleh berdasarkan:

$$T_{ref} = F_{ref} \cdot r \cdot T_{sc} \quad (1)$$

$$F_{ref} = F_a + F_g + F_d + F_r \quad (2)$$

$$F_a = ma \quad (3)$$

$$F_g = mg \sin(\theta) \quad (4)$$

$$F_d = \frac{1}{2} A_f C_d v^2 \quad (5)$$

$$F_r = C_r mg \cos(\theta) \quad (6)$$

dengan:

$T_{ref}$  = torsi referensi (N.m)

$\theta$  = sudut kemiringan jalan (rad)

$T_{sc}$  = skala torsi

$A_f$  = luas daerah depan kendaraan ( $m^2$ )

$r$  = jari-jari roda (m)

$a$  = percepatan kendaraan ( $m/s^2$ )

$m$  = massa mobil (kg)

$C_d$  = koefisien aerodinamis (-)

$g$  = gaya gravitasi ( $9,81 m/s^2$ )

$C_r$  = koefisien resistansi putaran ban (-)

$v$  = kecepatan kendaraan (m/s)

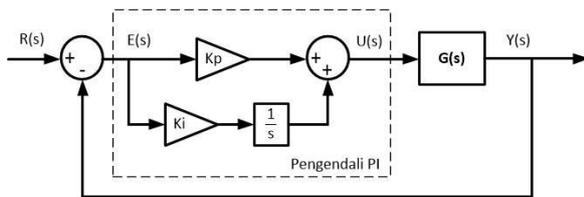
$F_{ref}$  = gaya referensi (N)

Skema kendali yang diterapkan pada MAS 1 adalah kendali kecepatan, sedangkan pada MAS 2 adalah kendali torsi. Oleh karena itu, pada paper ini akan dirancang pengendali PI sehingga respon kecepatan dan torsi mampu memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

## II. METODE

### A. Perancangan Pengendali PI

Pengendali PI merupakan salah satu konfigurasi yang dapat dirancang dari sistem kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Pada sistem kendali ini komponen yang digunakan hanya *Proportional* (P) dan *Integral* (I) saja. Metode kendali ini bertujuan untuk meningkatkan respon transien dari kendalian dan menghilangkan adanya kesalahan keadaan tunak (*error steady state*). Blok diagram dari sistem kendali PI terlihat pada Gambar 3.

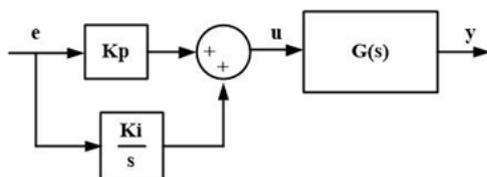


Gambar 3. Blok diagram sistem kendali PI

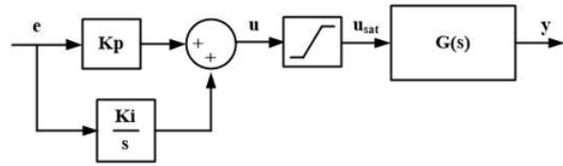
Berdasarkan skema tersebut, sinyal kendali yang dihasilkan memenuhi persamaan berikut:

$$U(s) = \left( Kp + \frac{Ki}{s} \right) E(s) \quad (7)$$

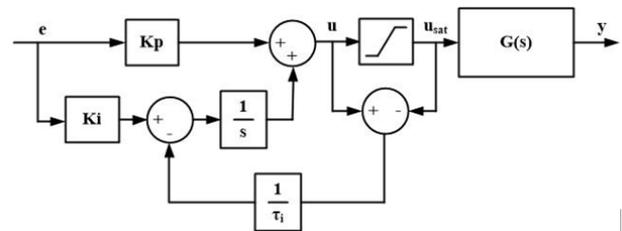
Pengendali PI dirancang dengan menggunakan tiga skema, yaitu: PI linier, PI dengan saturasi dan PI dengan *anti-windup* (PI-AW). Kendali PI linier dirancang tanpa mempertimbangkan adanya batasan dari sinyal kendali yang diperlukan. PI dengan saturasi dirancang dengan mempertimbangkan batasan sinyal kendali. PI-AW dirancang dengan tahapan [7]: (1) menghentikan akumulasi integral ketika saturasi terjadi; (2) membatasi nilai minimum dan maksimum integral; (3) mereduksi *input* integral ketika sinyal kendali saturasi; dan (4) pengendali PID *velocity mode* digunakan. Blok diagram dari ketiga skema kendali PI yang dirancang seperti pada Gambar 4.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Skema kendali PI yang dirancang: (a) PI linier (b) PI dengan saturasi (c) PI-AW [8]

Sinyal kendali yang dihasilkan ketika terdapat komponen saturasi adalah sebagai berikut:

$$u = \begin{cases} u, & u < u_{sat} \\ u_{sat}, & u \geq u_{sat} \end{cases} \quad (8)$$

Dengan adanya skema AW, maka sesuai dengan [8] sinyal kendali yang dihasilkan adalah:

$$u = Kp \cdot e + \frac{Ki}{s} e - \frac{1}{\tau_i s} (u - u_{sat}) \quad (9)$$

dengan:

$u$  = sinyal kendali

$u_{sat}$  = sinyal kendali saturasi

$e$  = sinyal kesalahan

$Kp, Ki$  = konstanta PI

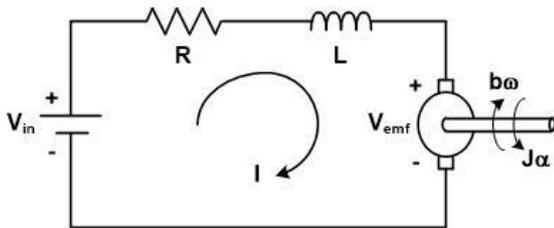
$\tau_i$  = waktu integral

### B. Pemodelan Kendalian

Agar dapat dilakukan perancangan pengendali PI, maka diperlukan model matematis dari kendalian (*plant*). Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk menentukan model dari suatu *plant*, diantaranya: pengukuran parameter secara langsung, identifikasi sistem, pendekatan respon orde satu, pendekatan respon orde dua, dsb. Pada paper ini, model dari MAS diperoleh dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) seperti pada persamaan (10) dengan cara pengukuran parameter secara langsung.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (10)$$

Gambar 5 memperlihatkan model rangkaian ekivalen dari MAS.



Gambar 5. Rangkaian ekivalen MAS

Model matematis dari MAS adalah sebagai berikut:

Persamaan mekanis:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Ki \quad (11)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{d\dot{\theta}}{dt} = -\frac{b}{J}\dot{\theta} + \frac{K}{J}i \quad (12)$$

dengan:

- J = momen inersia (kg.m<sup>2</sup>)
- $\dot{\theta}$  = kecepatan sudut (rad/s)
- b = koefisien gesekan (N.m.s)
- K = konstanta torsi/emf
- $\ddot{\theta}$  = percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>)
- i = arus (A)

Persamaan elektrik:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + V_{emf} = V_{in} \quad (13)$$

Karena  $V_{emf} = K\dot{\theta}$ , maka:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{V_{in}}{L} - \frac{K}{L}\dot{\theta} \quad (14)$$

dengan:

- L = induktansi (H)
- $V_{emf}$  = tegangan balik (V)
- R = resistansi (Ohm)
- $V_{in}$  = tegangan masukan (V)

Sehingga diperoleh model dalam bentuk ruang keadaan dengan  $x_1 = \dot{\theta}$ ,  $x_2 = i$  dan  $u = V_{in}$  adalah:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (15)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dengan menggunakan parameter pada [6]: R1 = 23 Ohm; R2 = 21,51 Ohm; L1 = L2 = 0,1 H; K1 = K2 = 0,055; b1 = b2 = 0,01 N.m.s; J1 = 0,0143 Kg.m<sup>2</sup>; J2 = 0,0146 Kg.m<sup>2</sup>. Maka model MAS 1 dan MAS 2 berturut-turut adalah:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,69 & 3,84 \\ -0,55 & -230 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix} u \quad y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

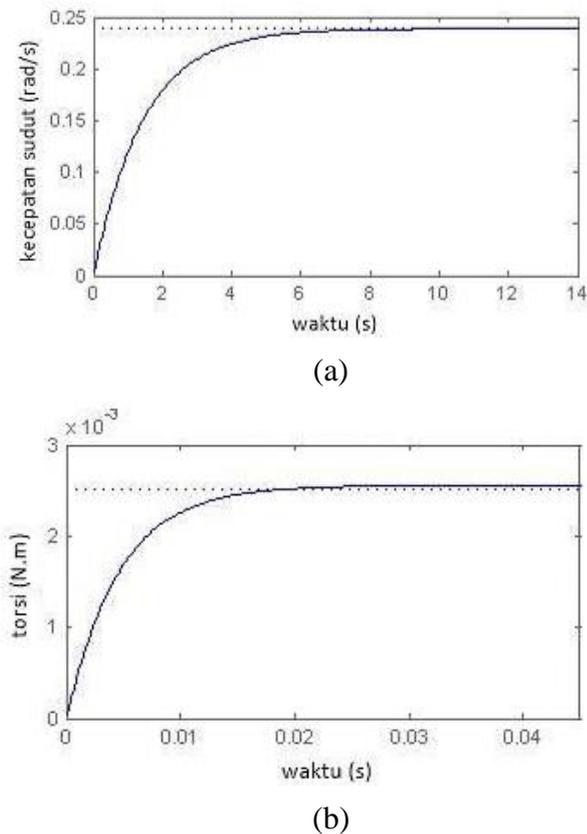
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,68 & 3,84 \\ -0,55 & -215,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix} u \quad y = [0 \quad 0,055] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

### C. Perancangan Parameter Pengendali PI

Pada bagian ini akan diuraikan cara untuk memperoleh parameter pengendali PI (Kp dan Ki). Parameter tersebut dapat dihitung berdasarkan spesifikasi respon yang diinginkan. Metode yang digunakan yaitu metode analisis matematis karena akan dapat diperoleh spesifikasi respon sesuai yang ditetapkan. Untuk menentukan besarnya Kp dan Ki sesuai spesifikasi respon yang diinginkan, model kendalian terlebih dahulu diubah menjadi bentuk fungsi alih orde satu berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (19)$$

Fungsi alih tersebut diperoleh berdasarkan karakteristik respon *open loop* orde satu dengan K adalah gain *steady state*,  $\tau$  adalah konstanta waktu (0,632K). Respon *open loop* dari MAS 1 dan MAS 2 dengan sinyal masukan *step response* (Gambar 6).



Gambar 6. Respon *open loop*: (a) MAS 1 dan (b) MAS 2

Dengan demikian fungsi alih MAS 1 dan MAS 2 adalah:

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{0,24}{1,45s + 1} = \frac{0,16}{s + 0,69} \quad (20)$$

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{0,0025}{0,0047s + 1} = \frac{0,53}{s + 212,76} \quad (21)$$

Berdasarkan karakteristik respon *open loop*, spesifikasi yang ditetapkan untuk respon MAS 1 adalah *settling time* ( $t_s$ ) 1 s dan *overshoot* ( $M_p$ ) 5%, sedangkan untuk respon MAS 2 adalah *settling time* ( $t_s$ ) 0,02 s dan *overshoot* ( $M_p$ ) 5%. Kemudian dilakukan perancangan parameter Kp dan Ki untuk menghasilkan respon sesuai yang ditetapkan. Persamaan *closed loop* dengan pengendali PI untuk kedua MAS adalah:

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{R(s)} = \frac{\left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \left(\frac{0,16}{s + 0,69}\right)}{1 + \left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \left(\frac{0,16}{s + 0,69}\right)} = \frac{0,16Kps + 0,16Ki}{s^2 + (0,69 + 0,16Kp)s + 0,16Ki} \quad (22)$$

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{\left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \left(\frac{0,53}{s + 212,76}\right)}{1 + \left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \left(\frac{0,53}{s + 212,76}\right)} = \frac{0,53Kps + 0,53Ki}{s^2 + (212,76 + 0,53Kp)s + 0,53Ki} \quad (23)$$

Berdasarkan pendekatan respon orde dua, diperoleh  $2\zeta\omega_n = 0,69 + 0,16Kp$ ,  $\omega_n^2 = 0,16Ki$  untuk MAS 1 dan  $2\zeta\omega_n = 212,76 + 0,53Kp$ ,  $\omega_n^2 = 0,53Ki$  untuk MAS 2. Selanjutnya koefisien redaman ( $\zeta$ ) dan frekuensi natural ( $\omega_n$ ) ditentukan sebagai berikut [9]:

$$M_p(\%OS) = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \quad (24)$$

Dengan spesifikasi  $M_p$  5%, maka  $\zeta$  untuk kedua MAS adalah 0,69.  $\omega_n$  ditentukan berdasarkan persamaan *settling time* kriteria 2% sebagai berikut [9]:

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (25)$$

Diperoleh frekuensi natural ( $\omega_n$ ) untuk MAS 1 = 5,79 rad/s dan MAS 2 = 289,85 rad/s. Dengan demikian diperoleh Kp dan Ki untuk MAS 1 adalah 45,62 dan 209,52 sedangkan Kp dan Ki untuk MAS 2 adalah 353,27 dan 158515,13. Ketika kondisi saturasi terjadi, maka sinyal kendali skema PI-AW untuk kedua MAS yang diperoleh berdasarkan persamaan (9) adalah:

$$u_{M1} = \left(45,62 + \frac{209,52}{s}\right)e - \frac{4,6}{s}(u - u_{sat}) \quad (26)$$

$$u_{M2} = \left(353,27 + \frac{158515,13}{s}\right)e - \frac{454,54}{s}(u - u_{sat}) \quad (27)$$

Konstanta  $1/\tau_i$  diperoleh dari  $Ki/Kp$  dengan  $\tau_i$  adalah waktu integral. Jika dipilih  $1/\tau_i = Ki$  maka, ketika saturasi tidak terjadi, fungsi alih pengendali sama dengan PI linier seperti pada persamaan (7).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui respon dari ketiga skema pengendali yang dirancang maka dilakukan simulasi pengujian pada Simulink MATLAB. Variabel dan parameter pengujian yang ditentukan untuk kedua MAS tercantum pada Tabel 1 dan Tabel 2.

TABLE I. VARIABEL DAN PARAMETER PENGUJIAN MAS 1

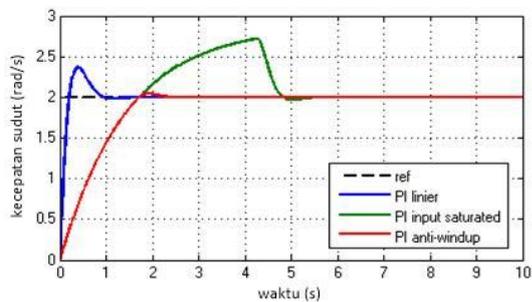
Variabel dan parameter	Nilai
Sinyal kendali maksimum	12 V
Kecepatan referensi ( <i>setpoint</i> )	2 rad/s
Kp	45,62
Ki	209,52

TABLE II.

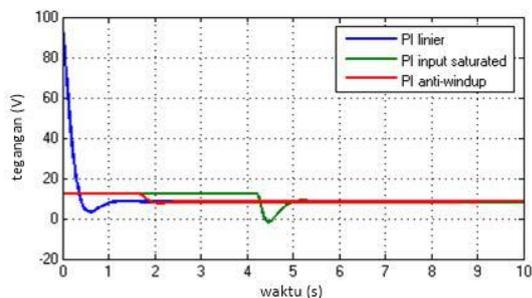
TABLE III. VARIABEL DAN PARAMETER PENGUJIAN MAS 2

Variabel dan parameter	Nilai
Sinyal kendali maksimum	12 V
Kecepatan referensi ( <i>setpoint</i> )	0,03 N.m
Kp	353,27
Ki	158515,13

Kecepatan referensi 2 rad/s diambil ketika kecepatan putaran motor pada mobil listrik sebesar 12,56 rps = 753,6 rpm. Dengan jari-jari roda 0,3 m dan rasio gearbox 1:5, maka sama dengan kecepatan translasi 3 m/s. Torsi referensi 0,03 N.m diperoleh ketika sudut kemiringan jalan 7,13°. Sudut kemiringan dihitung berdasarkan persamaan (1)-(6). Hasil simulasi yang diperoleh untuk MAS 1 dan MAS 2 terlihat pada Gambar 7.

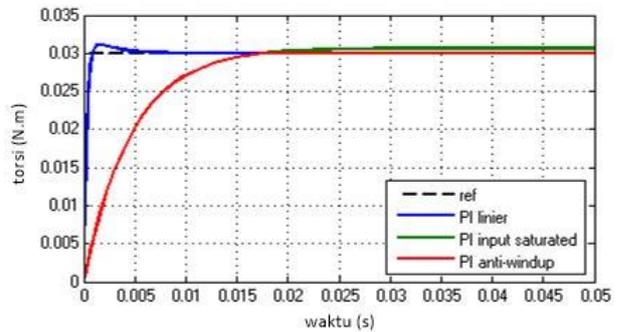


(a)

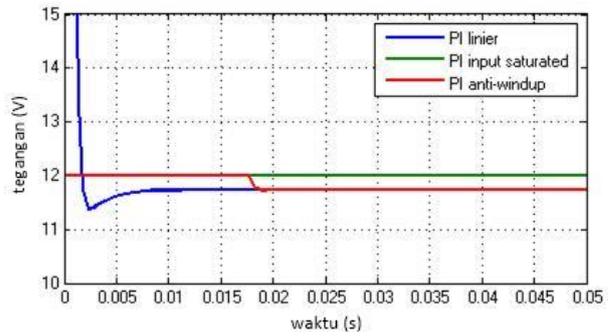


(b)

Gambar 7. Respon MAS 1: (a) kecepatan (a), (b) sinyal kendali



(a)



(b)

Gambar 8. Respon MAS 2: (a) torsi , (b) sinyal kendali.

TABLE IV. KARAKTERISTIK RESPON MAS 1

Parameter	PI linier	PI saturasi	PI-AW
Rise time ( $t_r$ )	0,2 s	1,7 s	1,7 s
Settling time ( $t_s$ )	1 s	4,8 s	2 s
Overshoot ( $M_p$ )	18,3 %	36 %	2,5 %

TABLE V. KARAKTERISTIK RESPON MAS 2

Parameter	PI linier	PI saturasi	PI-AW
Rise time ( $t_r$ )	0,0009 s	0,017 s	0,017 s
Settling time ( $t_s$ )	0,05 s	0,04 s	0,02 s
Overshoot ( $M_p$ )	3,6 %	2,3 %	0 %

Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon skema PI linier untuk MAS 1 menghasilkan *overshoot* 18,3%, sedangkan untuk MAS 2 menghasilkan *settling time* 0,05 s. Kedua karakteristik tersebut tidak memenuhi spesifikasi perancangan yang ditentukan. Hal ini

disebabkan adanya satu zero di  $s = -K_i/K_p$  yang terdapat pada fungsi alih *closed loop*. Berbeda dengan skema PI linier, respon skema PI-AW untuk MAS 1 menghasilkan *overshoot* sesuai spesifikasi yaitu 2,5% walaupun *settling time* yang dihasilkan lebih lama satu detik, sedangkan untuk MAS 2 menghasilkan *overshoot* dan *settling time* sesuai spesifikasi yaitu 0% dan 0,02 s. Dengan demikian skema PI-AW dapat menghasilkan respon terbaik untuk kedua MAS. Ketika saturasi terjadi AW telah mereduksi *overshoot* karena saturasi semaksimal mungkin pada respon MAS 1 dan juga masih dapat memberikan *zero steady state error* pada MAS 2. Selain itu sinyal kendali yang dihasilkan skema PI-AW tidak melebihi batas saturasi.

#### IV. KESIMPULAN

Skema pengendali PI telah dirancang untuk kendali kecepatan dan torsi pada simulator mobil listrik. Sistem kendali kecepatan dirancang untuk MAS 1 yang diasumsikan sebagai mobil listrik, sedangkan sistem kendali torsi dirancang untuk MAS 2 yang diasumsikan sebagai beban. Pengendali dirancang dalam tiga skema yaitu: PI linier, PI saturasi dan PI-AW. Hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan MAS 1 menghasilkan *overshoot* sesuai spesifikasi yang ditentukan walaupun *settling time* yang dihasilkan lebih lama satu detik, sedangkan respon torsi MAS 2 menghasilkan *overshoot* dan *settling time* sesuai spesifikasi yang ditentukan. Dengan demikian skema PI-AW mampu menghasilkan respon terbaik untuk kedua MAS dengan sinyal kendali yang tidak melebihi batas yang ditentukan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Price, W and Botelho, A (2012): Protodrive: Rapid prototyping and simulation for EV powertrains, University of Pennsylvania
- [2] Diaz, Stephanie (2012): Protodrive: Simulation of Electric Vehicle Powertrains, NSF Summer Undergraduate Fellowship in Sensor Technologies, Binghamton University
- [3] Price, W. (2012): Protodrive, <http://protodrive.blogspot.com/> (diakses: Januari 2016)
- [4] Mulay, A, Pant, YV, Mangharam, R. (2012): Protodrive: Rapid Prototyping Platform for Electric

Vehicle Powertrain,  
<http://mlab.seas.upenn.edu/protodrive/> (diakses:  
 Januari 2016)

- [5] Al Tahtawi, A.R., Rohman, A.S (2015): Simple Supercapacitor Charging Scheme in Electrical Car Simulator Using Direct Current Machines, Proceeding of The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI) Bali, pp. 623-628, ISBN: 978-1-4673-7319-7
- [6] Al Tahtawi, A.R., Rohman, A.S (2015): Skema Sederhana Pengisian Superkapasitor pada Simulator Mobil Listrik Menggunakan Mesin Arus Searah, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung