Disain Pengendali Slip pada *Haul Truck* Mengunakan Metode *Sliding Mode Controller*

Ahmad Faizal
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UIN SUSKA Riau, Pekanbaru
ahmadfaizal03@gmail.com

ABSTRACT

Changes in road conditions and friction wheel slip can result in the vehicle causing inconvenience to the user of the vehicle. To overcome this it is necessary to control the vehicle to slip in a state of minimal slip. In this study developed a method of control of the Direct Torque Control (DTC) in the three-phase induction motor is used as a vehicle to haul truck. By looking at the methods of the selected settings existing sliding mode method to overcome the problem of slip that occurs on the vehicle. DTC method is used to set the torque value directly, while the sliding mode method is used to regulate and minimize slippage that occurs in the vehicle. Simulations conducted in this research. The results of the simulation study shows that the method of sliding mode controller can minimize the slip according to setpoin 0.2. Slip the resulting values are in the range of provisions that slip occurs in a vehicle with a value of μ = 0 to μ = 1.

Keywords: Induction motor, Slip, Direct Torque Control, Sliding Mode Controller

INTISARI

Kondisi perubahan gaya gesek jalan dan roda dapat mengakibatkan terjadinya slip pada kendaraan sehingga menyebabkan ketidaknyamanan pada pengguna kendaraan. Untuk mengatasi hal tersebut maka diperlukan pengendali slip pada kendaraan agar berada pada kondisi slip yang minimal. Dalam penelitian ini mengembangkan metode kontrol *Direct Torque Control* (DTC) pada motor induksi tiga-phasa yang digunakan pada *haul truck* sebagai kendaraan. Dengan melihat metode-metode pengaturan yang ada maka dipilih metode *sliding mode* untuk mengatasi masalah slip yang terjadi pada kendaraan. Metode DTC digunakan untuk mengatur nilai torsi secara langsung, sedangkan metode *sliding mode* digunakan mengatur dan meminimalkan slip yang terjadi pada kendaraan. Simulasi dilakukan dalam penelitian ini. Hasil penelitian dengan simulasi menunjukkan bahwa metode pengendali *sliding mode* dapat meminimalkan slip sesuai dengan setpoin yaitu 0.2. Slip yang dihasilkan tersebut berada dalam *range* ketentuan nilai slip yang terjadi pada kendaraan dengan nilai μ=0 sampai μ=1.

Kata Kunci **:** Motor induksi, Slip, *Direct Torque Control* , *Sliding Mode Controller*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dalam peralatan dan fasilitas transportasi sekarang ini semakin berkembang, baik itu tansportasi darat, laut dan udara. Salah satu alat transportasi darat adalah *haul truck.* Truk ini banyak di gunakan pada industri pertambangan, *haul truck* adalah kelompok kendaraan dengan penggerak roda belakang yang termasuk jenis kendaraan berat. Truk ini dipakai pada industri pertambangan karena mudah dan fleksibel. Selama 20 tahun terakhir ini perkembangan *haul truck* telah berkembang dengan pesatnya, namun ada beberapa faktor pembatas *haul truck* berukuran besar seperti roda, mesin dan infrastruktur [1].

Slip merupakan masalah utama pada *haul truck* yang berpengaruh terhadap kinerja kendaraan sehingga mengakibatkan keterlambatan proses produksi dan distribusi. Slip adalah suatu fenomena yang menimbulkan gaya traksi pada roda penggerak, dan dapat mengakibatkan torsi yang besar terhadap gaya gesek antara roda dan permukaan jalan.

Motor induksi merupakan jenis motor elektrik yang paling luas dipergunakan untuk berbagai aplikasi dalam industri, disebabkan harga yang relatif murah dan memiliki keandalan yang tinggi. Motor induksi memiliki

konstruksi yang sederhana dan *robust* serta tahan dioperasikan dalam lingkungan yang berat, biaya perawatan yang rendah, dan rasio berat yang lebih tinggi dari pada jenis motor elektrik yang lain. Akan tetapi, motor induksi juga mempunyai beberapa kelemahan diantaranya adalah motor yang tidak linier, dan metoda untuk mengatur kecepatannya relatif rumit, disamping itu diperlukan suatu konsep *switching* yang akan menimbulkan harmonisa. Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan suatu metode pengendali yaitu *Direct Torque Control* (DTC).[2]

Penelitian tentang motor induksi dilakukan oleh Zhang Yongchang [3] meneliti tentang motor induksi dengan membandingkan pengendali PI, *sliding mode* dan *fuzzy logic,* dengan penggunaan pengendali *sliding mode* lebih baik dibandingkan dengan pengendali PI dan *fuzzy logic.* F. Zidan dkk [4] melakukan penelitian menggunakan adaptif *fuzzy* pada motor induksi dimana pengendali adaptip dapat beradaptasi dengan sistem. Dengan penggunaan metode adaptip *fuzzy* ini menghasilkan kelancaran transisi dalam hal transien dan torsi. Lakhdar Mokrani dkk [5] melakukan penelitian pengaturan motor induksi dengan metode *fuzzy* dengan memasukkan mekanisme adaptip, dimana dapat meningkatkan performansi pengaturan kecepatan motor dengan nilai *overshoot* yang rendah. Tian Haiyong dkk [6] dalam makalahnya membahas tentang pengaturan slip yang terjadi pada roda tanpa pengereman. Hasil dalam penelitian ini menunjukan ketahanan dan efektivitas dalam pengaturan slip yang terjadi pada roda saat mengalami gerakan, dimana menggunakan metode *fuzzy* yang digunakan untuk melakukan *switching* parameter permukaan. Brian Heber dkk [7] melakukan penelitian dengan mengaplikasikan pengendali *Fuzzy Logic* (FLC) yang dipadukan dengan pengendali *Proposional Integral Differensial* (PID) konvensional untuk mengendali kecepatan motor induksi. Penggunaan FLC dapat memperbaiki performansi dinamik motor induksi dibandingkan dengan penggunaan pengendali PID konvensional. Kartika Dewi [8] melakukan penelitian menggunakan metode adaptip *fuzzy* untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector* kontrol dapat memperbaiki respon *output* motor. Respon kecepatan motor dapat langsung dilihat dari performansinya ketika motor berputar dengan tidak adanya perubahan beban (Tl=0) maupun ketika adanya perubahan beban, tampak bahwa motor tetap dapat mempertahankan performansinya dengan waktu pemulihan 1,5 detik.

Dari berbagai pustaka yang dikaji, ada beberapa kelemahan yang ditemukan, yaitu mengurangi slip yang terjadi pada roda ban dengan menggunakan pengaturan pada motor induksi. Oleh karena itu akan diusulkan sebuah thesis yang akan meneliti tentang pengaturan slip dengan menggunakan *metode sliding mode control* yang diharapkan agar mendapatkan mengurangi *slip* yang terjadi pada *wheel haul truck.*

II. PERANCANGAN SISTEM

A. Parameter Motor Induksi

Adapun parameter-parameter motor induksi 150 KW yang digunakan dalam simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter motor induksi

No	Nama Parameter	Nilai
1	Tenaga motor (Kwatt)	150
2	Tegangan motor (volt)	460
3	Frekuensi (Hz)	60
4	Jumlah pasangan kutub	2
5	Tahanan stator (ohm)	0.435
6	Tahanan rotor (ohm)	0.816
7	Induktansi stator (H)	0.004
8	Induktansi rotor (H)	0.002
9	Induktansi Magnetic (H)	0.00131
10	Momen inersia (kg.m²)	0.185
11	Koefisien redaman (N.m.s/rad)	0.0006

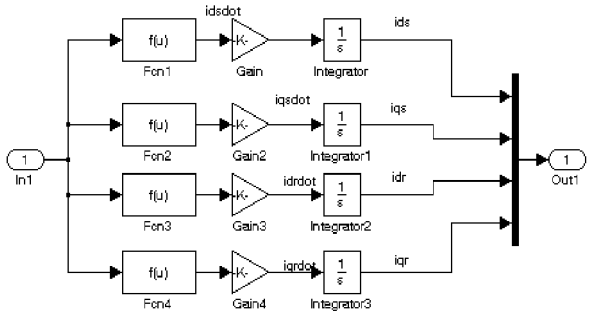
Pemodelan motor induksi dalam bentuk *state space* seperti pada Persamaan 1

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M^2 & -R_s L_s & \omega_r L_r L_s \\ -\omega_r M^2 & R_s L_r & \omega_r L_r M & R_r M \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \text{x} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \quad (1)$$

$$\frac{1}{D}\begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \text{x} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

dimana $D = L_s L_r - M^2$

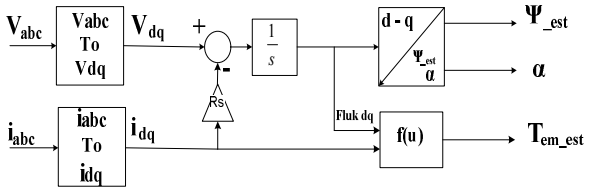
Adapun perancangan program simulink untuk motor induksi diatas ditunjukkan pada Gambar 1.



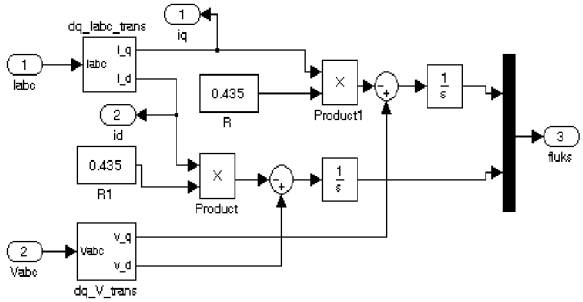
Gambar 1. Blok *simulink* pemodelan motor induksi

B. *Perancangan Estimator Fluks, Torsi dan Sudut Fluks*

Perancangan untuk *estimator fluks*, torsi dan sudut *fluks* dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Perancangan dalam blok *estimator fluks*, torsi dan sudut *fluks* menggunakan model persamaan *fluks stator*, torsi elektromagnetik, sudut *fluks stator* dan transformasi abc ke qd.



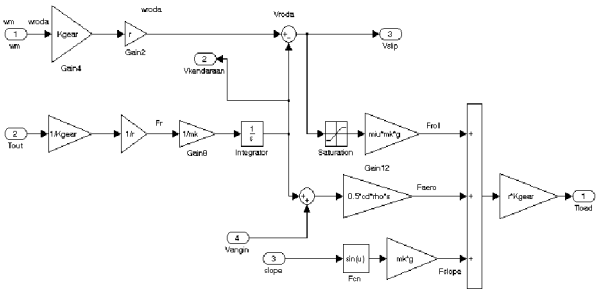
Gambar 2. Diagram estimator pada DTC



Gambar 3. Diagram blok *simulink* estimasi *fluks*, torsi dan sudut *fluks*

C. *Perancangan Slip Kendaraan*

Blok untuk pemodelan slip kendaraan loop terbuka seperti Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram roda penggerak dan slip

D. *Perancangan Pengendali Sliding Mode*

Saat didapatkan model *plant* untuk pengendali *sliding mode*, dirancanglah sebuah metode pengendali dengan menggunakan model *plant* orde-2 yang diinginkan dan membandingkan *error* dari *plant* motor induksi dan dinamika kendaraan dari *plant* model. Metode *sliding mode* menggunakan *plant* model diperoleh dari :

Suatu *plant* orde-2 memiliki fungsi alih :

$$\frac{b_1 \dot{u} + b_0 u}{a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_{0y}} \quad (2)$$

sehingga dapat ditulis :

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_1 \dot{u} + b_0 u$$

diambil model *plant* :

$$\frac{0.8485s + 5.101}{s^2 + 23.09s - 4.233}$$

dimana :

$b_1 = 0.8485 \quad a_2 = 1 \quad a_0 = 4.233$

$b_0 = 5.101 \quad a_1 = 23.09$

misalkan

$x_1 = y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y}$

$x_2 = \dot{x}_1 - 0.8485\,u \rightarrow \dot{x}_1 = x_2 + 0.8485\,u$

$\ddot{y} + 23.09\dot{y} - 4.233y = 0.8485\dot{u} + 5.101u$

$\ddot{y} = -23.09\dot{y} + 4.233y + 0.8485\dot{u} + 5.101u$

$\dot{x}_2 = -23.09\dot{y} + 4.233y + 0.8485\dot{u} + 5.101u - 0.8485\dot{u}$

$= -23.09\dot{y} + 4.233y + 5.101u$

$= -23.09\,x_2(x_2 + 0.8485\,u) + 4.233\,x_1 + 5.101\,u$

$\dot{x}_2 = -23.09\,x_2 - 19.592\,u + 4.233\,x_1 + 5.101\,u$

$= 4.233\,x_1 - 23.09\,x_2 + (5.101\,u - 19.592\,)u$

$= 4.233\,x_1 - 23.09\,x_2 - 14.491\,u$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 4.233 & -23.09 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.8485 \\ -14.491 \end{pmatrix}u$$

$$y = x_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Persamaan untuk mencari *error* dari sistem menjadi :

$$e = x_{1d} - x_1 \tag{3}$$

kemudian persamaan luncur yaitu :

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \qquad \text{dengan } n = 2 \tag{4}$$

$$S = \frac{d}{dt}e + \lambda e = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 + \lambda x_{1d} - x_1$$

Untuk mendapatkan nilai u_{eq} maka persamaan permukaan luncur diturunkan

$$\dot{S} = 0 = \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_1 + \lambda\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1$$

$$= 0 - \ddot{x}_1 - \lambda\dot{x}_1$$

jadi dimisalkan $x_1 = y$, maka :

$\ddot{x}_1 = \ddot{y} = -23.09\,\dot{y} + 4.233\,y + 0.8485\,\dot{u} + 5.101\,u$

$\dot{S} = 0$

$0 = -\ddot{x}_1 - \lambda\dot{x}_1$

$= 23.09\,\dot{y} - 4.233\,y - 0.8485\,\dot{u} - 5.101\,u - \lambda\dot{x}_1$

$0 = 23.09\dot{x}_1 - 4.233\,x_1 - 0.8485\,\dot{u} - 5.101u - \lambda\dot{x}_1$

$5.101\,u = 23.09\,\dot{x}_1 - 4.233\,x_1 - 0.8485\,\dot{u} - \lambda\dot{x}_1$

maka didapat u_{eq} menjadi :

$$u = \frac{1}{5.101}\{(23.09 - \lambda)\dot{x}_1 - 4.233\,x_1 - 0.8485\,\dot{u}\}$$

jadi sinyal $u = u_{eq} + u_n$ dimana sinyal diperolah dari fungsi Lyapunov dengan persamaan :

$$\dot{V} = S\dot{S} < 0$$

$$\dot{V} = S(u_n)$$

dimana nilai untuk $u_n = -\beta sign(S)$

$$\dot{V} = S\dot{S} < 0$$

$$= S\{-\beta sign(s)\} \tag{5}$$

atau

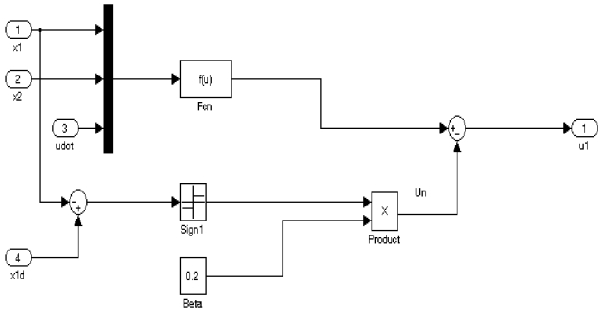
$$\dot{V} = -\beta|S|$$

sehingga persamaan untuk mencari u total sebagai berikut :

$$u = u_{eq} + u_n \tag{36}$$

$$u = \frac{1}{5.101}\{(23.09 - \lambda)\dot{x}_1 - 4.233x_1 - 0.8485\dot{u}\} - \beta sign(S)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, maka dirancanglah metode *sliding mode* berdasarkan perbedaan *error* model dengan *error plant* slip kendaraan.

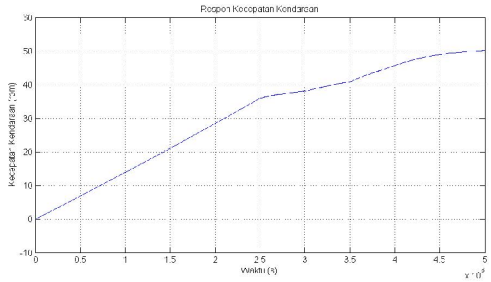


Gambar 5. Diagram *simulink* perancangan metode *sliding mode*

III. HASIL PERCOBAAN

A. Pengujian Motor Induksi dengan Dinamika Kendaraan Tanpa Pengendali

Pada tahapan ini pengujian dilakukan dengan menggabungkan antara motor induksi dan dinamika kendaraan untuk melihat hasil performa pada slip sebelum diberikan pengendali. Simulasi dilakukan dengan memberikan nilai fluks 0.8 wb dan nilai torsi 630 N.m. Hasil simulasi untuk melihat penggabungan antara motor induksi dan dinamika kendaraan dapat dilihat pada Gambar 6.

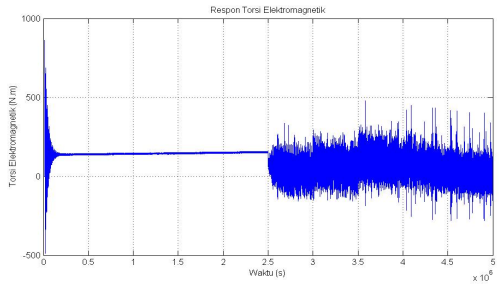


Gambar 6. Respon kecepatan kendaraan menggunakan motor induksi dan dinamika kendaraan

Dari hasil grafik pada Gambar 6 dapat dianalisa berupa kecapatan kendaraan yang diberikan beban sebesar 400 N.m pada motor induksi. Pada saat waktu 2.5 s adalah waktu tunak yang dialami keluaran kecepatan kendaraan. Dimana kecepatan kendaraan berada pada 50 rpm.

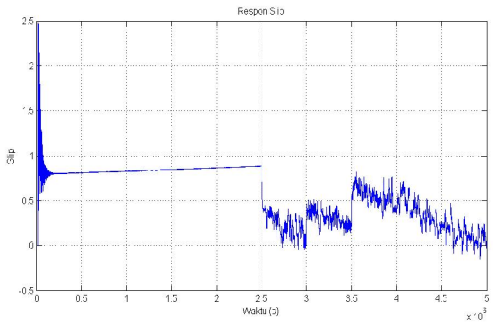
Tabel 2. Karakteristik Respon Dinamika tanpa kendali

Time Constant	*Settling Time*	*Rise Time*	*Delay Time*
τ (detik)	τ_s (detik)	τ_r (detik)	τ_d (detik)
2.4	3τ=7.2 4τ=9.6 5τ=12	ln19 =7.06 ln9 =5.27	ln2 =1.66



Gambar 7. Respon torsi elektromagnetik motor induksi pada dinamika kendaraan

Dari hasil grafik pada Gambar 7 dapat dianalisa berupa kecapatan motor induksi pada dinamika kendaraan. Pada saat waktu 2.3 s adalah waktu tunak yang dialami keluaran kecepatan motor induksi. Dimana kecepatan motor induksi berada pada 158 rpm.

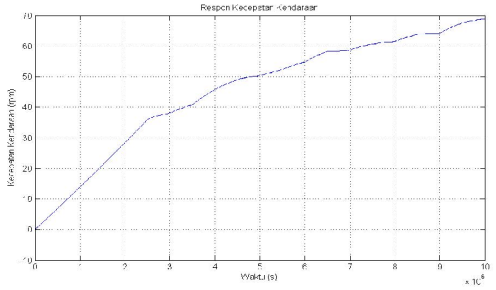


Gambar 8. Respon slip pada dinamika kendaraan

Pada Gambar 8 terlihat respon kecepatan slip, kecepatan mula slip sekitar 2.5 kemudian pada waktu 0.2 detik kembali pada kecepatan *steady state* kondisi waktu 0.8 detik. Kecepatan mula yang sangat besar ini diakibatkan karena arus starting pada motor induksi besar. Pada Gambar 4.12 kondisi slip sampai pada waktu 2.5 detik normal dalam kecepatan 0.8 sesuai dengan nilai masukan yang di berikan. Namun pada waktu 2.6 detik terjadi perubahan kecepatan slip yang menurun pada kecepatan 0.4.

B. Pengujian Motor Induksi dengan Dinamika Kendaraan Menggunakan Pengendali Sliding mode dengan Nilai Masukan 0.8, Nilai Beta 0.8, Lamda 0.8, Fluks 0.8 dan Torsi Beban Sebesar 630.

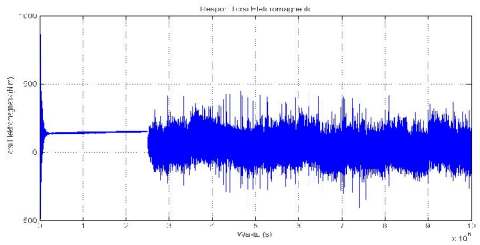
Pada tahapan pengujian ini akan dilakukan menggunakan pengendali *sliding mode*, dimana akan diatur nilai dari komponen yang berpengaruh pada sistem. Simulasi dilakukan dengan member nilai masukan *setpoint* sebesar 0.8. kemudian konstanta yang diatur seperti nilai beta 0.8, lamda 0.8 , fluks 0.8 dan torisi beban sebesar 630. Simulasi dilakukan selama 10 detik. Hasil simulasi untuk respon kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 9, respon untuk rotor motor induksi ditunjukkan pada Gambar 10, respon untuk torsi ditunjukan pada Gambar 11 dan respon untuk *slip* dengan pengendali *sliding mode* ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 10 Respon kecepatan kendaraan

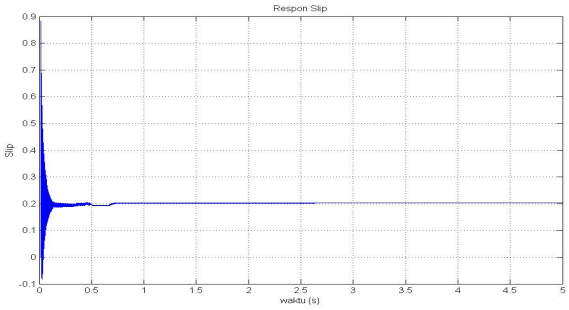
Tabel 3. Karakteristik Respon Dinamika dengan pengendali

Time Constant	*Settling Time*	*Rise Time*	*Delay Time*
τ (detik)	τ_s (detik)	τ_r (detik)	τ_d (detik)
3.5	3τ=10.5 4τ=14 5τ=17.5	τdn19 =10.3 τdn9 =7.6	τdn2 =2.4



Gambar 11 Respon torsi motor induksi

Respon torsi awal dengan masukan torsi yaitu berkisar 630 N.m mengikuti torsi masukan yang diberikan. Pada waktu 0-2.5 s nilai torsi berada pada 125 torsi adalah kondisi *steady state*, pada saat waktu 2.6 s sampai 10 s respon dan diperolah torsi sebesar 125-250 N.m. kemudian terjadi osislasi disebabkan adanya perubahan kecepatan pada kendaraan.



Gambar 12. Respon slip pada dinamika kendaraan menggunakan pengendali

Pada Gambar 12 terlihat respon kecepatan slip, kecepatan mula slip sekitar 0.9 kemudian pada waktu 0.3 detik kembali pada kecepatan *steady state* pada kecepatan 0.2. Kecepatan mula yang sangat besar ini diakibatkan karena arus starting pada motor induksi besar. Pada Gambar 12 kondisi slip sampai pada waktu 0.5 detik normal dalam kecepatan 0.2 sesuai dengan nilai masukan yang diberikan.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil perancangan dan simulasi pengenalian slip yang telah dilakukan didapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian dengan simulasi menunjukkan bahwa metode pengendali *sliding mode* dapat meminimalkan slip sesuai dengan setpoin yaitu 0.2. Slip yang dihasilkan tersebut berada dalam *range* ketentuan nilai slip yang terjadi pada kendaraan dengan nilai μ=0 sampai μ=1.
2. Kecepatan roda dapat mengikuti kecepatan kendaraan sehingga slip pada kendaraan tidak terjadi.

REFERENSI

[1] Barnes, Malcom (2003). "*Practical Variabel speed driver and power electronics*'. Newnes.

[2] A.A.Pujol (2000),"*Improvement in Direct Torque Control of Induction Motors*", Thèse de doctorat de L'UPC, November.

[3] Yongchang Z & Zhengming Z,(2002)," *Comparative Study of PI, Sliding mode and Fuzzy Logic Pengendali for Rotor Field Oriented Controlled Induction Motor Drives*", IEEE Transactions On Industry Applications.

[4] F. Zidani, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo' and A. Benchatb(2003)," *Active Fault-Tolerant Control of Induction Motor Drives in EV and HEV Against Sensor Failures Using a Fuzzy Decision Sistem*",IEEE Trans. On, hal.677 - 683 vol.2.

[5] Lakhdar M. & Katia K., (2004). " *Influence of Fuzzy Adapted Scaling Factor On The Performance of A Fuzzy Logic Pengendali Based On An Indirect Vector Control For Induction Motor Drive,* Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 55, NO. 7-8.

[6] Tian Haiyong, Shen Yanhua, Zhang Wenming, Jin Chun, (2011)," *Slip Ratio Control for Articulated Dump Truck Based on Fuzzy Sliding mode,* IEEE.

[7] Brian Heber, Longya Xu, Tang Yifan, 1997. *Fuzzy Logic Enhanceed Speed Control of an Indirect Field Oriented Induction Machine drive*. IEEE Transaction on Power Electronic. Vol 12 No.5.

[8] Dewi K.,(2011)*,"Perancangan Kontrol Traksi pada Electrical Wheel Haul Truck mengunakan Metode* Adaptip *Fuzzy Logic Pengendali (AFLC),"* Thesis Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya.

[9] Kaifler.(2000), "*Three phase motor 1TB 2830-3GA02 wheel haul truck",* Siemens.

[10] K. Hartani, M. Bourahla, Y. Miloud, M. Sekkour(2009)," *Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion Sistem*", *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol.17, No.1.

[11] Makoto Iwasaki, Tomohiro Shibata and Nobuyuki Matsui(1998)," *Disturban e Observer-Based Nonlinear Friction Compensationin Table Drive Sistem"*, IEEE/ASME trans on mechatronict,vol 4. No.1.pp-9-16.

[12] Slotine Weiping Li.(1991), "*Applied Nonlinear Control*". Prentice Hall.

[13] N. Djeghali, M. Ghanes, S. Djennoune, J. P. Barbot and M. Tadjine(2010)," *Fault Tolerant Control for Induction Motors using Sliding mode Observers,"*IEEE.

[14] Sutantra. I.Nyoman, "Teknologi Otomotif: teori dan Aplikasinya"Guna Widya, Surabaya, 2001.