

ABSTRAK

Andre Saputra

Skripsi

Pemodelan Sistem *Torque Vectoring* untuk Peningkatan Stabilitas dan Pengendalian Mobil Listrik

Perkembangan mobil listrik dalam beberapa tahun terakhir ini begitu pesat. Banyak produsen otomotif berlomba mengembangkan teknologi mobil listrik mereka sendiri. Dari sisi performa, mobil listrik menyediakan fleksibilitas dan kontrol yang lebih banyak daripada mobil konvensional. Salah satu sistem kontrol yang tersedia dan dikembangkan pada mobil listrik saat ini adalah *Torque Vectoring* (TV).

Yang dilakukan dalam penelitian ini adalah memodelkan dan mensimulasikan sistem TV pada MATLAB-Simulink. Dalam model ini dilakukan pengembangan algoritma sistem TV beserta sistem kontrol yang digunakan. Metode kontrol yang digunakan adalah kontroler PID. Variabel yang diukur untuk menilai efektivitas sistem TV adalah *yaw rate*, sudut kemudi, sudut *sideslip*, traksi pada setiap ban, percepatan longitudinal dan lateral, kecepatan longitudinal, *slip* longitudinal di setiap ban, dan torsi *output* di setiap roda.

Dari penelitian ini disimpulkan bahwa sistem TV mampu meningkatkan stabilitas dengan pengendalian mobil listrik. Sistem TV mampu beroperasi pada berbagai kondisi jalan dan manuver mobil, sehingga mobil dengan sistem TV (TV ON) lebih dapat dikendalikan dan stabil bila dibandingkan dengan mobil tanpa sistem TV (TV OFF). Selain itu, sistem TV dapat dikembangkan dengan menggunakan metode kontrol yang sederhana, seperti kontroler PID.

Kata Kunci:

Dinamika kendaraan, kendaraan listrik, distribusi torsi, *torque vectoring*, *active torque vectoring*, AWD, diferensial elektronik, PID

ABSTRACT

Andre Saputra

Thesis

Modeling of Torque Vectoring to Increase Stability and Handling of Electric Car

The development of electric cars has grown rapidly in the past few years. Many automotive companies compete to develop their own electric car technology. From the performance aspect, the electric car provides more flexibility and control than the conventional car. One of the control systems available and developed on an electric car is Torque Vectoring (TV).

What is done in this research is to model and simulate a TV system on MATLAB-Simulink. In this model, TV algorithm and control system used in this system has been developed. Variables measured to assess the effectiveness of this TV system are yaw rate, steering angle, sideslip angle, car position for each maneuver, traction for each tire, longitudinal and lateral acceleration, longitudinal velocity, longitudinal slip for each tire, and output torque for each wheel.

From this research, we can conclude that TV system can increase stability and handling of electric car. TV system can operate on various road conditions and maneuvers, so a car with TV system (TV ON) is more controllable and stable than a car without TV system (TV OFF). Furthermore, TV system can be developed by using a simple control method, like PID controller.

Keyword:

Vehicle dynamics, electric vehicle, torque distribution, torque vectoring, active torque vectoring, AWD, electronic differential, PID

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
DATA SKRIPSI / TUGAS AKHIR	iii
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxii
DAFTAR SIMBOL PADA MODEL SISTEM <i>TORQUE VECTORING</i>	xxiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	3
2. STUDI LITERATUR.....	5
2.1. Kinematika Kendaraan.....	5
2.2. <i>Forward Vehicle Dynamics</i>	7
2.2.1. Mobil yang Diam pada Jalan Mendatar dan Miring.....	7
2.2.2. Mobil yang Berakselerasi dalam Arah Longitudinal.....	9
2.2.3. Mobil yang Berakselerasi dalam Arah Lateral.....	11
2.2.4. Mobil yang Berakselerasi dalam Arah Longitudinal dan Lateral	12
2.3. Dinamika Ban.....	15
2.3.1. Jari-Jari Efektif Ban	15
2.3.2. Gaya Longitudinal Ban	15
2.3.3. Gaya Lateral Ban	17
2.3.4. <i>Friction Ellipse</i>	18
2.3.5. Model Ban <i>Magic Formula</i>	20

2.4.	Dinamika Kemudi.....	22
2.5.	<i>Vehicle Planar Dynamics</i>	23
2.5.1.	Persamaan Dinamika Kendaraan.....	24
2.5.2.	Sistem Gaya pada Roda	25
2.5.3.	Komponen Gaya Kendaraan dengan Model Roda 2 (<i>Bicycle Model</i>)	26
2.5.4.	Dinamika Kendaraan Planar Roda Dua (<i>Bicycle Model</i>)	28
2.5.5.	<i>Steady-State Turning</i>	32
2.5.6.	Dinamika Kendaraan Planar Roda Empat	38
2.6.	Sistem Kontrol.....	40
2.6.1.	Konfigurasi Sistem Kontrol	41
2.6.2.	Tujuan Analisa dan Desain Sistem Kontrol	43
2.6.3.	Proses Desain Sistem Kontrol	44
2.7.	Kontroler PID (<i>Proportional Integral Derivative</i>).....	44
2.7.1.	Struktur Kontroler PID	45
2.7.2.	Representasi Kontroler PID	47
2.7.3.	<i>Tuning</i> Kontroler PID	48
2.7.4.	<i>Integral Windup</i>	51
2.7.5.	Kontroler PID 2-DOF (<i>2 Degree of Freedom</i>).....	53
2.8.	<i>In-Wheel Motors</i> (IWM)	55
2.9.	<i>Torque Vectoring</i> (TV)	56
2.9.1.	Penelitian Sistem TV dengan Metode Kontrol <i>Fuzzy Logic</i>	59
2.9.2.	Penelitian Sistem TV dengan Metode Kontrol LPV	61
2.9.3.	Penelitian Sistem TV dengan Metode Kontrol MPC	64
2.9.4.	Penelitian Sistem TV dengan Metode Kontrol PID	66
2.9.5.	Penelitian Sistem TV dengan Metode Kontrol SMC	69
2.10.	MATLAB	70
2.11.	Simulink	72
2.11.1.	<i>Block</i> pada Simulink.....	73
2.11.2.	<i>Solver</i> pada Simulink.....	82
2.12.	Manuver Kendaraan.....	84
2.13.	<i>Low-Pass Filter</i>	86
3.	METODE PENYELESAIAN TUGAS AKHIR	87
3.1.	Menentukan Parameter untuk Pemodelan Dinamika Kendaraan	88
3.2.	Menentukan Parameter untuk Pemodelan Sistem <i>Torque Vectoring</i> ...	88
3.3.	Menentukan Mekanisme Sistem.....	89
3.4.	Menentukan Simulasi Manuver Kendaraan yang Digunakan.....	89
3.5.	Menentukan Spesifikasi Kendaraan untuk Pemodelan.....	90
3.6.	Menentukan Parameter untuk Sistem Kontrol	91
3.7.	Memodelkan Dinamika Kendaraan dan <i>Reference Value Generator</i> ..	91
3.8.	Memodelkan Algoritma <i>Torque Vectoring</i>	91
3.9.	Memodelkan Sistem Kontrol.....	92
3.10.	Simulasi Sistem	92
3.11.	Pembahasan Hasil Simulasi	93
3.12.	Kesimpulan dan Saran	94
3.13.	Pembuatan Laporan	94

4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	96
4.1.	Pemodelan Dinamika Kendaraan	96
4.1.1.	Pemodelan <i>Vehicle Handling</i>	96
4.1.2.	Pemodelan <i>Vehicle Ride</i>	103
4.1.3.	Pemodelan Ban	109
4.2.	Pemodelan Sistem <i>Torque Vectoring</i>	118
4.2.1.	Pemodelan <i>Reference Yaw Rate Generator</i>	118
4.2.2.	Pemodelan Kontrol <i>Yaw Rate</i>	120
4.2.3.	Pemodelan Kontrol Distribusi Torsi ke Roda	122
4.3.	Prosedur Simulasi	131
4.4.	Prosedur <i>Tuning</i> Kontroler	132
4.5.	Hasil Simulasi dan Pembahasan	133
4.5.1.	DLC 80 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.3$ (Manuver 1)	133
4.5.2.	DLC 80 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.6$ (Manuver 2)	139
4.5.3.	DLC 80 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.9$ (Manuver 3)	143
4.5.4.	DLC 120 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.3$ (Manuver 4)	148
4.5.5.	DLC 120 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.6$ (Manuver 5)	153
4.5.6.	DLC 120 km/jam, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.9$ (Manuver 6)	157
4.5.7.	FTA, $T_{\max} = 800 \text{ Nm}$, $\mu = 0.3$ (Manuver 7)	162
4.5.8.	FTA, $T_{\max} = 1200 \text{ Nm}$, $\mu = 0.6$ (Manuver 8)	165
4.5.9.	FTA, $T_{\max} = 1500 \text{ Nm}$, $\mu = 0.9$ (Manuver 9)	169
4.5.10.	<i>Split mu</i> , $T_{\max} = 800 \text{ Nm}$, $\mu_L = 0.3$, $\mu_R = 0.6$ (Manuver 10)	174
4.5.11.	<i>Split mu</i> , $T_{\max} = 1200 \text{ Nm}$, $\mu_L = 0.6$, $\mu_R = 0.9$ (Manuver 11)	179
5.	KESIMPULAN	184
5.1.	Kesimpulan	184
5.2.	Saran	185
	DAFTAR REFERENSI	187
	LAMPIRAN	194

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Pengaruh Pengaturan Masing-Masing <i>Gain</i> PID terhadap Sistem	49
Tabel 2.2. Jenis dari <i>Solver</i> Tipe <i>Variable-Step</i>	83
Tabel 2.3. Jenis dari <i>Solver</i> Tipe <i>Fixed-Step</i>	84
Tabel 3.1. Manuver yang akan Digunakan pada Simulasi	90
Tabel 4.1. Koefisien untuk rumus ban (dengan pengaruh beban)	109
Tabel 4.2. Koefisien untuk rumus ban (dengan pengaruh beban)	109
Tabel 4.3. Perbandingan Waktu Manuver pada Manuver 1 s/d 6	168
Tabel 4.4. Performa Akselerasi TV ON dan TV OFF pada Manuver 7	170
Tabel 4.5. Performa Akselerasi TV ON dan TV OFF pada Manuver 8	175
Tabel 4.6. Performa Akselerasi TV ON dan TV OFF pada Manuver 9	179

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kendaraan yang bergerak, ditunjukkan oleh <i>body coordinate frame</i> B pada <i>global coordinate frame</i> G	5
Gambar 2.2. Kendaraan kaku dalam gerakan planar	6
Gambar 2.3. Gaya pada mobil ketika parkir pada jalan mendatar (tampak samping).....	7
Gambar 2.4. Gaya pada mobil ketika parkir pada jalan mendatar (tampak depan)	8
Gambar 2.5. Gaya pada mobil ketika berakselerasi pada jalan mendatar (tampak kanan).....	9
Gambar 2.6. Gaya pada mobil ketika berakselerasi pada jalan mendatar (tampak depan).....	11
Gambar 2.7. Gaya pada mobil ketika berakselerasi secara longitudinal dan lateral (tampak kiri belakang)	12
Gambar 2.8. Mobil pada jalan mendatar dengan akselerasi longitudinal a_x	13
Gambar 2.9. Mobil dengan beban vertikal F_{zf} pada as depan dan dengan akselerasi lateral a_y	13
Gambar 2.10. Jari-jari geometris R_g , jari-jari efektif R_w , dan tinggi pusat ban R_h dari ban yang menggelinding dan diberi beban.....	15
Gambar 2.11. Koefisien gesek longitudinal sebagai fungsi dari rasio slip s	17
Gambar 2.12. Sudut <i>camber</i> dan <i>sideslip</i>	17
Gambar 2.13. Arah angular dari ban yang bergerak sepanjang vektor kecepatan v pada sudut <i>sideslip</i> α dan sudut kemudi δ . (a) $\alpha > 0$. (b) $\alpha < 0$	18
Gambar 2.14. <i>Friction ellipse</i>	19
Gambar 2.15. Penjelasan parameter <i>Magic Formula</i>	20
Gambar 2.16. Kendaraan FWS dengan kondisi Ackerman	23
Gambar 2.17. Model sepeda yang setara untuk kendaraan FWS	23
Gambar 2.18. Sistem gaya pada ban nomor 1.....	25
Gambar 2.19. Model sepeda untuk kendaraan yang bergerak tanpa <i>roll</i>	26
Gambar 2.20. Kinematika gerakan kendaraan lateral.....	30
Gambar 2.21. <i>Curvature response</i> kendaraan yang <i>neutral steer</i> , <i>understeer</i> , dan <i>oversteer</i> pada sudut kemudi yang tetap	35

Gambar 2.22. Hubungan antara sudut kemudi dengan kecepatan kendaraan <i>neutral steer</i> , <i>understeer</i> , dan <i>oversteer</i>	36
Gambar 2.23. Penjelasan singkat dari sistem kontrol.....	40
Gambar 2.24. Respon <i>elevator</i>	40
Gambar 2.25. <i>Block diagram</i> dari sistem kontrol <i>open-loop</i>	41
Gambar 2.26. <i>Block diagram</i> dari sistem kontrol <i>open-loop</i>	42
Gambar 2.27. Respon Sistem	42
Gambar 2.28. <i>Block diagram</i> kontroler PID	45
Gambar 2.29. Kontroler PID dengan <i>derivative filter</i>	47
Gambar 2.30. Metode respons <i>step</i> Ziegler-Nichols	50
Gambar 2.31. Kontroler dengan <i>anti-windup</i>	52
Gambar 2.32. Kontroler PID 2-DOF tipe <i>feedforward</i>	54
Gambar 2.33. Kontroler PID 2-DOF tipe <i>feedback</i>	54
Gambar 2.34. <i>In-Wheel Motor</i>	55
Gambar 2.35. Konfigurasi dan komponen dari <i>In-Wheel Motor</i>	55
Gambar 2.36. Kontrol dan fungsi yang bisa dicapai dengan IWM	56
Gambar 2.37. Definisi <i>Torque Vectoring</i>	58
Gambar 2.38. Efek dari <i>Torque Vectoring</i>	58
Gambar 2.39. <i>Yaw rate</i> dan sudut <i>sideslip</i> pada saat manuver <i>double-lane-change</i> (kiri) dan <i>steep-steer</i> (kanan)	60
Gambar 2.40. Jalur kendaraan yang diinginkan dan aktual ketika mengerem pada jalan dengan koefisien gesek berbeda (μ -split road).....	61
Gambar 2.41. Hasil pengujian kontroler pada manuver <i>open-loop</i>	61
Gambar 2.42. Torsi pada ban untuk setiap roda.....	62
Gambar 2.43. Hasil simulasi kecepatan (kiri) dan <i>yaw rate</i> (kanan) ketika bermanuver.....	62
Gambar 2.44. Sudut roda kemudi pada manuver <i>double lane change</i>	63
Gambar 2.45. <i>Yaw rate</i> , kecepatan, dan slip roda kanan depan pada manuver <i>double lane change</i>	64
Gambar 2.46. <i>Yaw rate</i> mobil pada manuver <i>double lane change</i> dengan $\mu = 0.6$	65

Gambar 2.47. <i>Yaw rate</i> mobil pada manuver <i>double lane change</i> dengan $\mu = 0.4$	65
Gambar 2.48. <i>Yaw rate</i> yang diperoleh dari hasil simulasi sistem (garis tebal lurus) pada kecepatan 80 km/jam (kiri) dan 120 km/jam (kanan)	67
Gambar 2.49. Komparasi <i>yaw rate</i> referensi dan <i>yaw rate</i> nyata tanpa sistem <i>Torque Vectoring</i>	68
Gambar 2.50. Komparasi <i>yaw rate</i> referensi dan <i>yaw rate</i> nyata dengan sistem <i>Torque Vectoring</i>	68
Gambar 2.51. Torsi yang dihasilkan motor pada setiap roda	69
Gambar 2.52. Momen <i>yaw</i> keluaran pada pengujian manuver <i>double lane change</i> tanpa angin samping	70
Gambar 2.53. <i>Startup</i> MATLAB	70
Gambar 2.54. Tampilan awal MATLAB	71
Gambar 2.55. Tampilan Simulink	72
Gambar 2.56. Unsur pada Simulink	73
Gambar 2.57. Simulink <i>Library Browser</i> dan bagian-bagiannya	74
Gambar 2.58. <i>Block PID Controller</i>	74
Gambar 2.59. <i>Block PID Controller</i> (2DOF)	75
Gambar 2.60. <i>Block Transfer Fcn</i>	75
Gambar 2.61. <i>Block Saturation Dynamic</i>	76
Gambar 2.62. Beberapa <i>block</i> untuk Operasi Matematika	76
Gambar 2.63. <i>Block If</i> (kiri) dan <i>If Action Subsystem</i> (kanan)	77
Gambar 2.64. Penggunaan <i>block If</i> dan <i>If Action Subsystem</i>	77
Gambar 2.65. <i>Block Inport</i> dan <i>Outport</i>	77
Gambar 2.66. <i>Block Subsystem</i>	78
Gambar 2.67. <i>Block Subsystem</i>	78
Gambar 2.68. <i>Block From</i> dan <i>Goto</i>	79
Gambar 2.69. Kesamaan <i>block From</i> dan <i>Goto</i> dengan garis sinyal biasa	79
Gambar 2.70. <i>Block Mux</i> dan <i>Demux</i>	79
Gambar 2.71. Kelebihan penggunaan <i>block Mux</i> dan <i>Demux</i>	80
Gambar 2.72. <i>Block Merge</i>	80
Gambar 2.73. <i>Block Display</i> dan <i>Scope</i>	81

Gambar 2.74. <i>Block To Workspace</i>	81
Gambar 2.75. <i>Block Constant</i>	82
Gambar 2.76. <i>Block MATLAB Function</i>	82
Gambar 2.77. Dimensi jalur DLC	85
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> metodologi penelitian	88
Gambar 3.2. Skema model dari sistem <i>Torque Vectoring</i>	93
Gambar 4.1. <i>Free body diagram</i> dari model <i>vehicle handling</i>	97
Gambar 4.2. <i>Block diagram</i> dari model gerak longitudinal kendaraan	97
Gambar 4.3. <i>Block diagram</i> dari model gerak lateral kendaraan	98
Gambar 4.4. <i>Block diagram</i> dari model gerak yaw kendaraan	99
Gambar 4.5. <i>Block diagram</i> dari model gerak berputar pada roda kendaraan....	100
Gambar 4.6. <i>Block diagram</i> dari model sudut <i>sideslip</i> pada tiap roda	101
Gambar 4.7. <i>Block diagram</i> dari model <i>slip</i> longitudinal pada tiap roda	102
Gambar 4.8. <i>Block diagram</i> dari model <i>slip</i> longitudinal pada tiap roda	103
Gambar 4.9. <i>Block diagram</i> dari model <i>vehicle handling</i> pada tiap roda	103
Gambar 4.10. <i>Free body diagram</i> dari model <i>vehicle ride</i>	104
Gambar 4.11. <i>Free body diagram</i> dari model gaya di setiap roda	105
Gambar 4.12. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.21	105
Gambar 4.13. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.22	105
Gambar 4.14. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.23	106
Gambar 4.15. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.24 dan 4.25	106
Gambar 4.16. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.26	106
Gambar 4.17. Gerak <i>roll</i> karena percepatan lateral	107
Gambar 4.18. <i>Block diagram</i> dari model gerak <i>roll</i> kendaraan	107
Gambar 4.19. Gerak <i>pitch</i> karena percepatan longitudinal	108
Gambar 4.20. <i>Block diagram</i> dari model gerak <i>pitch</i> kendaraan	108
Gambar 4.21. <i>Block diagram</i> dari model total gaya normal	108
Gambar 4.22. <i>Block diagram</i> dari model <i>vehicle ride</i>	109
Gambar 4.23. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.36 (D)	110
Gambar 4.24. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.37 (BCD)	110
Gambar 4.25. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.38 (B)	110
Gambar 4.26. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.39 (E)	111

Gambar 4.27. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.34 (x)	111
Gambar 4.28. <i>Block diagram</i> dari setiap <i>factor</i> untuk model gaya longitudinal	111
Gambar 4.29. <i>Block diagram</i> dari model gaya longitudinal pada ban	111
Gambar 4.30. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.44 (D)	112
Gambar 4.31. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.45 (BCD)	112
Gambar 4.32. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.46 (B)	112
Gambar 4.33. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.47 (E)	113
Gambar 4.34. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.48 (ΔS_h) dan 4.49 (ΔS_v)	113
Gambar 4.35. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.42 (x)	113
Gambar 4.36. <i>Block diagram</i> dari setiap <i>factor</i> untuk model gaya lateral	114
Gambar 4.37. <i>Block diagram</i> dari model gaya lateral pada ban	114
Gambar 4.38. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.53 (D)	115
Gambar 4.39. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.54 (BCD)	115
Gambar 4.40. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.55 (B)	115
Gambar 4.41. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.56 (E)	115
Gambar 4.42. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.57 (ΔS_h) dan 4.58 (ΔS_v)	116
Gambar 4.43. <i>Block diagram</i> dari Persamaan 4.51 (x)	116
Gambar 4.44. <i>Block diagram</i> dari setiap <i>factor</i> untuk model <i>aligning moment</i> .	116
Gambar 4.45. <i>Block diagram</i> dari model <i>aligning moment</i> pada ban	116
Gambar 4.46. <i>Block diagram</i> dari model semua gaya dan momen pada ban	117
Gambar 4.47. <i>Block diagram</i> dari model ban secara keseluruhan	117
Gambar 4.48. <i>Block diagram</i> dari model dinamika kendaraan secara keseluruhan	118
Gambar 4.49. <i>Block diagram</i> dari pemodelan ψ_{ideal}	119
Gambar 4.50. <i>Block diagram</i> dari pemodelan ψ_{max}	119
Gambar 4.51. <i>Block diagram</i> dari <i>reference yaw rate generator</i>	120
Gambar 4.52. <i>Block diagram</i> dari kontroler PID untuk kontrol <i>yaw rate</i>	121
Gambar 4.53. <i>Block diagram</i> dari model distribusi koreksi torsi	122
Gambar 4.54. <i>Block diagram</i> dari kontrol <i>yaw rate</i>	122
Gambar 4.55. <i>Block diagram</i> dari <i>Yaw Rate Controller</i>	123
Gambar 4.56. <i>Block diagram</i> dari model kontrol <i>slip</i> longitudinal	125
Gambar 4.57. <i>Block diagram</i> dari model kontrol <i>friction ellipse</i>	127

Gambar 4.58. <i>Block diagram</i> dari model kontrol batas saturasi	129
Gambar 4.59. <i>Block diagram</i> dari kontrol <i>on-off switch</i> kontroler sistem.....	129
Gambar 4.60. <i>Block diagram</i> dari sistem kontrol distribusi torsi ke roda	129
Gambar 4.61. <i>Block diagram</i> dari sistem TV.....	130
Gambar 4.62. <i>Block diagram</i> dari model dinamika kendaraan dan sistem TV ..	130
Gambar 4.63. <i>Toolbar</i> pada Simulink	131
Gambar 4.64. Perbandingan posisi mobil pada manuver 1.....	133
Gambar 4.65. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 1.....	134
Gambar 4.66. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 1	134
Gambar 4.67. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 1.....	135
Gambar 4.68. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 1 untuk TV ON	135
Gambar 4.69. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 1.....	136
Gambar 4.70. Sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 1 untuk TV ON.....	136
Gambar 4.71. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 1.....	137
Gambar 4.72. Sudut kemudi pada manuver 1 untuk TV ON.....	137
Gambar 4.73. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 1.....	139
Gambar 4.74. Torsi <i>output</i> pada manuver 1 untuk TV ON	139
Gambar 4.75. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 1	140
Gambar 4.76. Perbandingan posisi mobil pada manuver 2.....	140
Gambar 4.77. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 2.....	141
Gambar 4.78. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 2	142
Gambar 4.79. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 2.....	142
Gambar 4.80. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 2.....	143
Gambar 4.81. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 2.....	143
Gambar 4.82. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 2.....	144
Gambar 4.83. Torsi <i>output</i> pada manuver 2 untuk TV ON	144
Gambar 4.84. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 2	145
Gambar 4.85. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada penelitian oleh Ren et al. (2015)....	145
Gambar 4.86. Perbandingan posisi mobil pada manuver 3.....	146
Gambar 4.87. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 3.....	147
Gambar 4.88. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 3	147
Gambar 4.89. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 3.....	148

Gambar 4.90. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 3.....	148
Gambar 4.91. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 3.....	149
Gambar 4.92. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 3.....	150
Gambar 4.93. Torsi <i>output</i> pada manuver 3 untuk TV ON	150
Gambar 4.94. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 3	151
Gambar 4.95. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada penelitian oleh Jalali et al. (2013) ..	151
Gambar 4.96. Perbandingan posisi mobil pada manuver 4.....	151
Gambar 4.97. Perbandingan kondisi mobil ketika bermanuver pada manuver 4	152
Gambar 4.98. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 4.....	153
Gambar 4.99. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 4	153
Gambar 4.100. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 4.....	154
Gambar 4.101. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 4 untuk TV ON	154
Gambar 4.102. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 4.....	155
Gambar 4.103. Sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 4 untuk TV ON.....	155
Gambar 4.104. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 4.....	156
Gambar 4.105. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 4.....	156
Gambar 4.106. Torsi <i>output</i> pada manuver 4 untuk TV ON	157
Gambar 4.107. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 4	157
Gambar 4.108. Perbandingan posisi mobil pada manuver 5.....	158
Gambar 4.109. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 5.....	159
Gambar 4.110. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 5	159
Gambar 4.111. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 5.....	160
Gambar 4.112. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 5.....	160
Gambar 4.113. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 5.....	161
Gambar 4.114. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 5.....	162
Gambar 4.115. Torsi <i>output</i> pada manuver 5 untuk TV ON	162
Gambar 4.116. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 5	162
Gambar 4.117. Perbandingan posisi mobil pada manuver 6.....	163
Gambar 4.118. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 6.....	163
Gambar 4.119. Perbandingan percepatan lateral mobil pada manuver 6	164
Gambar 4.120. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 6.....	165
Gambar 4.121. Perbandingan sudut <i>sideslip</i> setiap roda pada manuver 6.....	165

Gambar 4.122. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 6.....	166
Gambar 4.123. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 6.....	167
Gambar 4.124. Torsi <i>output</i> pada manuver 6 untuk TV ON	167
Gambar 4.125. Perbandingan <i>yaw rate</i> pada manuver 6	167
Gambar 4.126. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 7.....	168
Gambar 4.127. Perbandingan percepatan longitudinal mobil pada manuver 7 ..	169
Gambar 4.128. Perbandingan kecepatan longitudinal mobil pada manuver 7....	170
Gambar 4.129. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 7.....	170
Gambar 4.130. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 7 untuk TV ON	171
Gambar 4.131. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 7.....	172
Gambar 4.132. Torsi <i>output</i> pada manuver 7 untuk TV ON	172
Gambar 4.133. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 8.....	173
Gambar 4.134. Perbandingan percepatan longitudinal mobil pada manuver 8 ..	174
Gambar 4.135. Perbandingan kecepatan longitudinal mobil pada manuver 8....	174
Gambar 4.136. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 8.....	175
Gambar 4.137. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 8 untuk TV ON	176
Gambar 4.138. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 8.....	176
Gambar 4.139. Torsi <i>output</i> pada manuver 8 untuk TV ON	177
Gambar 4.140. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 9.....	177
Gambar 4.141. Perbandingan percepatan longitudinal mobil pada manuver 9 ..	178
Gambar 4.142. Perbandingan kecepatan longitudinal mobil pada manuver 9....	179
Gambar 4.143. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 9.....	180
Gambar 4.144. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 9 untuk TV ON	180
Gambar 4.145. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 9.....	181
Gambar 4.146. Torsi <i>output</i> pada manuver 9 untuk TV ON	181
Gambar 4.147. Perbandingan torsi pada roda depan dengan dan tanpa menggunakan <i>low-pass filter</i>	182
Gambar 4.148. Perbandingan posisi mobil pada manuver 10.....	183
Gambar 4.149. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 10.....	183
Gambar 4.150. Perbandingan percepatan longitudinal mobil pada manuver 10	184
Gambar 4.151. Perbandingan kecepatan longitudinal mobil pada manuver 10..	185
Gambar 4.152. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 10.....	185

Gambar 4.153. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 10 untuk TV ON	186
Gambar 4.154. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 10.....	187
Gambar 4.155. Sudut kemudi pada manuver 10 untuk TV ON.....	187
Gambar 4.156. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 10.....	188
Gambar 4.157. Torsi <i>output</i> pada manuver 10 untuk TV ON	188
Gambar 4.158. Perbandingan posisi mobil pada manuver 11.....	189
Gambar 4.159. Perbandingan <i>friction ellipse</i> setiap ban pada manuver 11.....	189
Gambar 4.160. Perbandingan percepatan longitudinal mobil pada manuver 11	190
Gambar 4.161. Perbandingan kecepatan longitudinal mobil pada manuver 11..	191
Gambar 4.162. Perbandingan <i>slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 11	192
Gambar 4.163. <i>Slip</i> longitudinal setiap ban pada manuver 11 untuk TV ON	192
Gambar 4.164. Perbandingan sudut kemudi pada manuver 11.....	193
Gambar 4.165. Sudut kemudi pada manuver 11 untuk TV ON.....	193
Gambar 4.166. Perbandingan torsi <i>output</i> pada manuver 11	194
Gambar 4.167. Torsi <i>output</i> pada manuver 11 untuk TV ON	194

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Spesifikasi Mobil yang Digunakan dalam Simulasi	205
Lampiran 2: Spesifikasi IWM yang Digunakan dalam Simulasi	206
Lampiran 3: <i>Coding</i> M-File untuk Konstanta dalam Pemodelan Sistem TV	207
Lampiran 4: <i>Coding</i> M-File untuk Konstanta Kontroler pada Sistem TV	209
Lampiran 5: <i>Coding</i> pada MATLAB <i>Function Block</i> untuk Distribusi Torsi	210
Lampiran 6: Nilai <i>Gain</i> untuk Setiap Kontroler pada Sistem TV	211

DAFTAR SIMBOL PADA MODEL SISTEM *TORQUE VECTORING*

$\%throttle$	Rasio pedal <i>throttle</i> (0 = pedal tidak diinjak, 1 = pedal diinjak penuh)
δ	Sudut kemudi roda depan
$\Delta T_{\dot{\psi}_1}$	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>yaw rate</i> pada roda depan kiri
$\Delta T_{\dot{\psi}_4}$	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>yaw rate</i> pada roda depan kanan
$\Delta T_{\dot{\psi}_3}$	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>yaw rate</i> pada roda belakang kiri
$\Delta T_{\dot{\psi}_4}$	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>yaw rate</i> pada roda belakang kanan
δ_1	Sudut kemudi roda depan kiri
δ_2	Sudut kemudi roda depan kanan
ΔT_{fc_1}	Koreksi torsi berdasarkan <i>friction ellipse</i> pada roda depan kiri
ΔT_{fc_2}	Koreksi torsi berdasarkan <i>friction ellipse</i> pada roda depan kanan
ΔT_{fc_3}	Koreksi torsi berdasarkan <i>friction ellipse</i> pada roda belakang kiri
ΔT_{fc_4}	Koreksi torsi berdasarkan <i>friction ellipse</i> pada roda belakang kanan
ΔT_{s_1}	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>slip</i> longitudinal pada roda depan kiri
ΔT_{s_2}	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>slip</i> longitudinal pada roda depan kanan
ΔT_{s_3}	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>slip</i> longitudinal pada roda belakang kiri
ΔT_{s_4}	Koreksi torsi berdasarkan kontrol <i>slip</i> longitudinal pada roda belakang kanan
μ_{x_1}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah X pada roda depan kiri
μ_{x_2}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah X pada roda depan kanan
μ_{x_3}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah X pada roda belakang kiri
μ_{x_4}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah X pada roda belakang kanan
μ_{y_1}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah Y pada roda depan kiri

μ_{y_2}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah Y pada roda depan kanan
μ_{y_3}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah Y pada roda belakang kiri
μ_{y_4}	Koefisien gesek antara ban dan jalan pada arah Y pada roda belakang kanan
$\dot{\psi}$	<i>Yaw rate</i> mobil sebenarnya
$\dot{\psi}_{ideal}$	<i>Yaw rate</i> yang ingin dicapai
$\dot{\psi}_{max}$	<i>Yaw rate</i> maksimum
$\dot{\psi}_{ref}$	<i>Reference yaw rate</i>
σ	<i>Contribution factor</i>
a_1	Jarak antara titik tengah roda depan ke pusat massa mobil
a_2	Jarak antara titik tengah roda depan ke pusat massa mobil
a_x	Percepatan longitudinal
a_y	Percepatan lateral
c_1	Konstanta 1 untuk <i>low-pass filter</i>
c_2	Konstanta 2 untuk <i>low-pass filter</i>
$e_{\dot{\psi}}$	<i>Error</i> antara nilai <i>reference yaw rate</i> terhadap nilai <i>yaw rate</i> sebenarnya
e_s	<i>Error</i> antara nilai <i>error slip</i> sebenarnya dengan nilai <i>error</i> yang di-filter
F_{x_1}	Gaya longitudinal pada depan kiri
F_{x_2}	Gaya longitudinal pada depan kanan
F_{x_3}	Gaya longitudinal pada belakang kiri
F_{x_4}	Gaya longitudinal pada belakang kanan
F_{y_1}	Gaya lateral pada depan kiri
F_{y_2}	Gaya lateral pada depan kanan
F_{y_3}	Gaya lateral pada belakang kiri
F_{y_4}	Gaya lateral pada belakang kanan
F_{z_1}	Gaya normal pada depan kiri
F_{z_2}	Gaya normal pada depan kanan
F_{z_3}	Gaya normal pada belakang kiri
F_{z_4}	Gaya normal pada belakang kanan
g	Percepatan gravitasi (9.80665 m/s^2)
$G_{\dot{\psi}}$	<i>Gain</i> untuk kontrol <i>yaw rate</i>
G_{fc}	<i>Gain</i> untuk kontrol <i>friction ellipse</i>
$G_{s,F}$	<i>Gain</i> untuk kontrol <i>slip</i> pada roda depan
$G_{s,R}$	<i>Gain</i> untuk kontrol <i>slip</i> pada roda belakang
K	Koefisien <i>understeer</i>

$K_{D_{\dot{\psi}}}$	Konstanta <i>derivative</i> untuk kontrol <i>yaw rate</i>
$K_{D_{fc}}$	Konstanta <i>derivative</i> untuk kontrol <i>friction ellipse</i>
K_{D_s}	Konstanta <i>derivative</i> untuk kontrol <i>slip longitudinal</i>
$K_{I_{\dot{\psi}}}$	Konstanta <i>integral</i> untuk kontrol <i>yaw rate</i>
$K_{I_{fc}}$	Konstanta <i>integral</i> untuk kontrol <i>friction ellipse</i>
K_{I_s}	Konstanta <i>integral</i> untuk kontrol <i>slip longitudinal</i>
$K_{P_{\dot{\psi}}}$	Konstanta <i>proportional</i> untuk kontrol <i>yaw rate</i>
$K_{P_{fc}}$	Konstanta <i>proportional</i> untuk kontrol <i>friction ellipse</i>
K_{P_s}	Konstanta <i>proportional</i> untuk kontrol <i>slip longitudinal</i>
l	Panjang <i>wheelbase</i> mobil
m	Massa mobil
$N_{\dot{\psi}}$	Konstanta <i>filter</i> untuk kontrol <i>yaw rate</i>
N_{fc}	Konstanta <i>filter</i> untuk kontrol <i>friction ellipse</i>
N_s	Konstanta <i>filter</i> untuk kontrol <i>slip longitudinal</i>
p	<i>Setpoint weight</i> pada bagian <i>proportional</i>
q	<i>Setpoint weight</i> pada bagian <i>derivative</i>
s_1	<i>Slip longitudinal</i> pada depan kiri
s_2	<i>Slip longitudinal</i> pada depan kanan
s_3	<i>Slip longitudinal</i> pada belakang kiri
s_4	<i>Slip longitudinal</i> pada belakang kanan
s_{max}	<i>Slip longitudinal</i> maksimum (0.15)
T_{base}	Torsi yang diminta pengemudi berdasarkan %throttle
T_{max}	Torsi <i>output</i> motor maksimum
T_{out_1}	Torsi <i>output</i> motor pada depan kiri
T_{out_2}	Torsi <i>output</i> motor pada depan kanan
T_{out_3}	Torsi <i>output</i> motor pada belakang kiri
T_{out_4}	Torsi <i>output</i> motor pada belakang kanan
v_x	Kecepatan longitudinal