



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *SUPERVISORY CONTROL*
PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* UNTUK
*QUARTER VEHICLE***

**MUHAMMAD NASHRUL FIKRI
NRP. 0231154000074**

**Dosen Pembimbing :
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

**DESIGN SUPERVISORY CONTROL FOR ANTI-
LOCK BRAKING SYSTEM AT QUARTER
VEHICLE**

**MUHAMMAD NASHRUL FIKRI
NRP. 0231154000074**

Supervisors :
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Muhammad Nashrul Fikri
NRP : 0231154000074
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Supervisory Control* pada *Anti-Lock Braking System* untuk *Quarter vehicle*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 26 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,




Muhammad Nashrul Fikri
NRP. 0231154000074

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

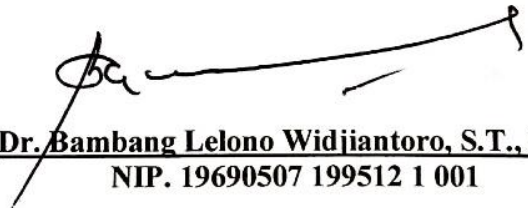
**PERANCANGAN *SUPERVISORY CONTROL* PADA
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM UNTUK *QUARTER*
*VEHICLE***

Oleh :

Muhammad Nashrul Fikri
NRP. 0231154000074


Surabaya, 30 Juli 2019

Menyetujui,
Pembimbing I


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 19690507 199512 1 001

Mengetahui
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS




Agus Muhammad Jafar, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN *SUPERVISORY CONTROL* PADA
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM UNTUK *QUARTER*
*VEHICLE***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD NASHRUL FIKRI
NRP. 0231154000074

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
3. Ir. Yaumar, M.T. (Penguji I)
4. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc. (Penguji II)

SURABAYA
JULI, 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN *SUPERVISORY CONTROL* PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* UNTUK *QUARTER* *VEHICLE*

Nama : Muhammad Nashrul Fikri
NRP : 0231154000074
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T

Abstrak

Sistem pengereman yang umum dipakai oleh kendaraan berpenumpang saat ini adalah *Anti-Lock Braking System* (ABS). Mobil yang memiliki sistem pengereman ini dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan akan meningkatkan manuverabilitas dibandingkan dengan mobil yang tidak memiliki ABS. Kendaraan tidak selalu bekerja pada kondisi jalan yang sama. Untuk itu diperlukan *Supervisory Control* yang mampu menyesuaikan nilai *set point* ke kondisi optimal. Perancangan *Supervisory Control* telah mampu untuk menghasilkan output *slip ratio* yang optimal. Hal ini ditunjukkan dengan pengujian *Supervisory Control* pada jalan aspal kering dan aspal basah. Pada jalan aspal kering, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,2. Respon sistem berada disekitar *Set point* dan berhenti pada detik ke – 1,3008. Pada jalan aspal basah, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,13. Respon sistem berada disekitar *Set point* dan berhenti pada detik ke – 1,4056. Pada pengujian perubahan jalan, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,13 dan 0,2. Respon sistem berada disekitar *Set point* dan berhenti pada detik ke – 1,299.

Kata Kunci: *Anti-Lock Braking System, Supervisory Control, Sliding Mode Control*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN SUPERVISORY CONTROL FOR ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM AT QUARTER VEHICLE

Name : ***Muhammad Nashrul Fikri***
NRP : ***0231154000074***
Department : ***Teknik Fisika FTI-ITS***
Supervisors : ***Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.***

Abstract

The common braking system used by passenger vehicles today is the Anti-Lock Braking System (ABS). Cars that have a braking system can reduce the stopping distance and increase maneuverability compared to cars that do not have ABS. Vehicles do not always work on the same road conditions. For this reason a Supervisory Control is needed that is able to adjust the value of the set point to optimal conditions. The Supervisory Control design has been able to produce the optimal output ratio ratio. This is indicated by Supervisory Control testing on dry asphalt and wet asphalt roads. On dry asphalt roads, the system has been able to produce an optimal slip ratio value of 0.2. The system response is around the Set point and stops at seconds - 1,3008. On wet asphalt roads, the system has been able to produce an optimal slip ratio value of 0.13. The system response is around the Set point and stops at seconds - 1.4056. In the road change test, the system has been able to produce an optimal slip ratio value of 0.13 and 0.2. The system response is around the Set point and stops at 1.299 seconds.

Keywords : ***Anti-Lock Braking System, Supervisory Control, Sliding Mode Control***

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“PERANCANGAN SUPERVISORY CONTROL PADA ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM UNTUK QUARTER VEHICLE”**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Bambang Lelono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Ibu Dyah Sawitri, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Sun'an dan Ibu Karsini). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moral dan materiil yang telah diberikan.
6. Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa, terima kasih untuk semuanya.
7. Teman – teman Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2015, terima kasih untuk semuanya.
8. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
9. Teman - teman LDK JMMI ITS yang telah menemani penulis bermain selama menempuh pendidikan di ITS.

10.Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 28 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
<i>Title Page</i>	iii
Pernyataan Bebas Plagiarisme	v
Lembar Pengesahan I.....	vii
Lembar Pengesahan II	Error! Bookmark not defined.
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xii
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i>	5
2.2 <i>Sliding Mode Control (SMC)</i>	10
2.5 <i>Sliding Mode Optimization</i>	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Pemodelan <i>Quarter Car Model (QCM)</i>	15
3.2 Pembuatan Sistem Kontrol <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i>	24
3.3 Pembuatan <i>Sliding Mode Optimization</i>	27
3.4 Pengujian <i>Supervisory Control</i> pada <i>Quarter vehicle</i> ..	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Uji Validasi Pemodelan <i>Quarter Car Model (QCM)</i> ..	31
4.2 Uji <i>Close Loop</i> Menggunakan <i>Sliding Mode Controller</i>	32
4.3 Uji <i>Supervisory Control</i>	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Kesimpulan	45

5.2	Saran	46
	DAFTAR PUSTAKA	47
	LAMPIRAN	
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan <i>slip ratio</i> roda (Li, 2010)...	6
Gambar 2.2	Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS (Motors, 2015).....	8
Gambar 2.3	Komponen ABS dengan rem hidraulik (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011).....	9
Gambar 2.4	Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013).....	10
Gambar 2.5	<i>Sliding Mode</i> berbasis <i>Optimizer</i> (Fu, 2000).....	12
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	15
Gambar 3.2	Diagram blok <i>Anti-Lock Braking System</i>	16
Gambar 3.3	Pemodelan Quarter Car	16
Gambar 3.4	Dinamika sistem pengereman	18
Gambar 3.5	Dinamika yang bekerja pada <i>quarter car model</i> (Mirzaenejad & Mirzaei, 2014).....	22
Gambar 3.6	<i>Sliding Mode Optimization</i> (Fu, 2000).....	29
Gambar 4.1	Respon dari uji <i>open loop</i> pada simulasi	31
Gambar 4.2	Respon kecepatan kendaraan dan roda tanpa ABS	32
Gambar 4.3	Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> pengendalian <i>Sliding Mode Controller</i> dengan <i>set point</i> 0,1	33
Gambar 4.4	Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan <i>set point</i> 0,1.....	34
Gambar 4.5	Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> pengendalian <i>Sliding Mode Controller</i> dengan <i>set point</i> 0,25	34
Gambar 4.6	Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan <i>set point</i> 0,25.....	35
Gambar 4.7	Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> pengendalian <i>Sliding Mode Controller</i> dengan menaikkan <i>set point</i>	36
Gambar 4.8	Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan menaikkan <i>set point</i>	37

Gambar 4.9	Grafik respon dari hasil uji pada jalan aspal kering	38
Gambar 4.10	Respon kecepatan kendaraan dan roda pada jalan aspal kering	39
Gambar 4.11	Grafik respon dari hasil uji pada jalan aspal basah	40
Gambar 4.12	Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS pada jalan aspal basah	41
Gambar 4.13	Grafik respon dari hasil uji pada perubahan jalan	42
Gambar 4.14	Respon kecepatan kendaraan dan roda pada perubahan jalan	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman (Guo, Jian, & Lin, 2014).....	17
Tabel 3.2	Parameter pemodelan aktuator hidrolik (Fu, 2000)	21
Tabel 3.3	Parameter pemodelan roda pada gaya pengereman (Guo, Jian, & Lin, 2014)	22
Tabel 3.4	Parameter koefisien gesekan pada permukaan jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014) (Ling & Lang, 2012).....	23
Tabel 3.5	Parameter pemodelan aktuator hidrolik (Fu, 2000)	27
Tabel 3.6	Parameter pada <i>Supervisory Control</i> (Will, Hui, & Zak, 1998).....	29

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data kepolisian, rata-rata terdapat 3 orang meninggal setiap jam akibat kecelakaan. Dari data tersebut, 9% penyebab terjadinya kecelakaan adalah faktor kendaraan (Biro Komunikasi dan Informasi Publik Kementerian Perhubungan, 2017). Oleh karena itu, keamanan kendaraan merupakan hal yang penting untuk dikaji karena menyangkut keselamatan dalam berkendara. Keamanan merupakan salah satu area yang populer dalam pengembangan teknologi otomotif hari ini. Salah satu sistem keamanan mobil yang banyak dikaji ialah sistem pengereman (Shah, 2016).

Sistem pengereman memiliki fungsi penting dalam pengoperasian kendaraan. Kendaraan bergerak dan berjalan pada jalan yang tidak selalu rata. Demikian juga, tidak hanya berjalan pada jalan yang lurus terkadang kendaraan berbelok saat berada pada tikungan dan berhenti secara tiba-tiba. Untuk mengatasinya, maka setiap kendaraan harus dilengkapi dengan sistem pengereman yang lebih aman. Pada saat pengemudi menginginkan kendaraan berhenti secara tiba-tiba serta ingin memperlambat laju kendaraan, maka rem sangat dibutuhkan untuk mengontrol kecepatan kendaraan (Deton, 2006).

Sistem pengereman yang umum dipakai oleh kendaraan berpenumpang saat ini adalah *Anti-Lock Braking System (ABS)*. ABS merupakan sistem pengereman yang berfungsi untuk mencegah roda pada mobil untuk terkunci ketika adanya pengereman darurat atau pengereman secara mendadak (Chen & Wang, 1996). Berdasarkan observasi pada kecelakaan kendaraan pada tahun 1992 dan 1993 di lima negara bagian Amerika Serikat, ditemukan bahwa kemungkinan mobil yang dilengkapi ABS menabrak bagian belakang mobil di depannya lebih kecil 48 persen dibandingkan mobil tanpa ABS (Evans & Gerrish, 1996). Pengereman tanpa menggunakan ABS akan menyebabkan penguncian roda sehingga kendaraan tidak stabil. Ketika roda

terkunci, gangguan sekecil apapun akan mengakibatkan rotasi kendaraan. Sebagai hasilnya, mobil yang memiliki sistem pengereman ini dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan akan meningkatkan manuverabilitas dibandingkan dengan mobil yang tidak memiliki ABS (Lee & Zak, 2002). Beberapa negara telah mewajibkan ABS pada sistem pengereman. Pada tahun 2014, Uni-Eropa mewajibkan produsen untuk menanamkan ABS pada mobil dan disusul sepeda motor dengan kapasitas mesin 125 cc keatas pada tahun 2016. Peraturan yang sama pada sepeda motor juga berlaku di India mulai tahun 2018. Sementara itu, pemerintah Australia mewajibkan setiap truk trailer dilengkapi dengan ABS per 2015 (Imandiar, 2018).

ABS menunjukkan karakteristik *nonlinier* yang kuat. Kendaraan yang dilengkapi dengan pengontrol linier masih dapat memiliki kecenderungan *oversteer* dan menjadi tidak stabil. Untuk itu perlu dikembangkan *Sliding Mode Control* (SMC) yang mampu bekerja secara stabil pada sistem pengereman hidrolis. Selain itu, kendaraan tidak selalu bekerja pada kondisi jalan yang sama. Pada kondisi jalan yang berbeda memiliki nilai *slip ratio* yang berbeda pula. Pemakaian *slip ratio* yang sama pada kondisi jalan yang berbeda akan mengakibatkan jarak henti kendaraan yang lebih jauh. Untuk itu diperlukan *Supervisory Control* yang mampu menyesuaikan nilai *set point* ke kondisi optimal. Salah satu *Supervisory Control* yang saat ini dikembangkan pada ABS adalah *Sliding Mode Optimizer*. Oleh karena itu, maka diperlukan perancangan *Antilock Braking System* dengan pengendalian *Sliding Mode Control* dengan *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer* untuk *Quarter vehicle* yang mampu menyesuaikan kondisi lintasan serta mampu mengatasi keadaan *manuver oversteer*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana merancang model dinamik dari sistem pengereman pada *Quarter vehicle*?
- Bagaimana merancang sistem pengendalian berbasis *Sliding Mode Control* pada *Anti-Lock Braking System (ABS)*?
- Bagaimana cara merancang *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer* yang dapat mengoptimalkan kinerja *Anti-Lock Braking System (ABS)*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Merancang model dinamik dari sistem pengereman pada *Quarter vehicle*.
- Merancang sistem pengendalian berbasis *Sliding Mode Control* pada *Anti-Lock Braking System (ABS)*.
- Merancang *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer* yang dapat mengoptimalkan kinerja *Anti-Lock Braking System (ABS)*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa jenis kendaraan berpenumpang.
- Sistem hidrolik diasumsikan tidak mengalami kebocoran.
- Kendaraan diasumsikan dengan kondisi pengereman sampai berhenti.
- Kendaraan diasumsikan berada pada lintasan lurus, datar dan tidak bergelombang.
- *Slip ratio* merupakan variabel yang dikendalikan.
- Simulasi dilakukan pada *Simulink Matlab2014a*.
- Kecepatan roda dan kecepatan mobil merupakan variabel yang diukur.
- Simulasi dilakukan pada jalan aspal kering dan aspal basah.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**
Bab I berisi mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan dari tugas akhir ini.
- **BAB II DASAR TEORI**
Bab II penjelasan mengenai teori yang dapat menunjang dalam tugas akhir ini, seperti pengertian dari *Anti-Lock Braking System (ABS)*, *Sliding Mode Control*, *Supervisory Control*.
- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.
- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**
Pada bab IV ini berisi tentang perbandingan sistem ABS dengan sistem kendali konvensional dan ABS dengan menggunakan *Supervisory Control*.
- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**
Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

BAB II DASAR TEORI

2.1 *Anti-Lock Braking System (ABS)*

Anti-Lock Braking System (ABS) digunakan di mobil modern masa kini memiliki 2 alasan yang pertama adalah untuk menghindari penguncian pada roda sehingga kendaraan dapat bermanuver dan meminimalkan jarak pengereman. Selanjutnya *slip ratio* akan dijaga pada titik yang optimal kendaraan untuk meminimalkan jarak pengereman pada kendaraan dan meningkatkan stabilitas kendaraan (Li, 2010). ABS pertama kali diterapkan untuk kereta api ditahun 1943, kemudian diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil pada tahun 1971 dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas kendaraan, dan meningkatkan *steerability* selama pengereman,. Pada proses pengereman, terjadi *tractive force* yang dihasilkan oleh ban sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan yang digunakan tergantung variasi atau koefisien jalan seperti kering, basah, dan lain sebagainya, serta karakteristik lekukan jalan seperti jalanan yang berlubang, rata, dan lain sebagainya. Pada penelitian yang dilakukan terdapat grafik fungsi non-linear antara *breaking effort coefficient* (μ) yaitu koefisien gesekan antara ban dan permukaan jalan dengan *slip ratio* roda (λ) pada kondisi jalanan tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa pada kondisi jalan bersalju, gesekan antara ban dan jalan memiliki μ (*breaking effort coefficient*) yang sangat rendah dan mengakibatkan resiko slip roda semakin tinggi. Sebaliknya dengan kondisi jalan aspal kering dan aspal basah yang dapat dikatakan kondisi jalan normal, gesekan memiliki μ yang besar, sehingga resiko roda akan slip menjadi sangat rendah. Nilai μ diperoleh melalui persamaan (2.1).

$$\mu(\lambda, v) = (C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda)e^{-C_4\lambda v} \quad (2.1)$$

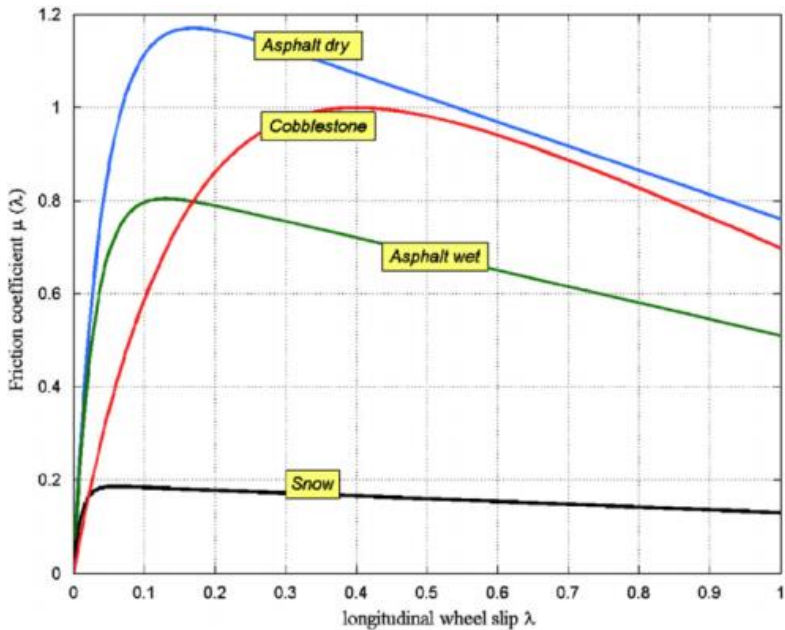
Dimana:

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Bentuk kurva gesekan

C_3 = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$

C_4 = Nilai karakteristik kebasahan jalan



Gambar 2.1. Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan *slip ratio* roda (Li, 2010)

Pada jurnal penelitian (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011) nilai *slip ratio* roda (λ) memiliki persamaan yang didefinisikan sebagaimana persamaan (2.2).

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2.2)$$

Dimana:

ω = Kecepatan sudut pada roda (rad/s)

R = Jari – jari putaran roda (m)

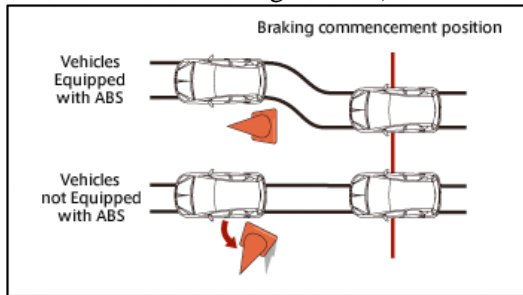
V = Kecepatan kendaraan (m/s)

Saat kondisi normal berkendara, $V = \omega R$, *slip ratio* (λ) akan bernilai 0. Ketika saat terjadi pengereman yang parah, dapat didefinisikan $\omega = 0$ ketika $\lambda = 1$ dan hal tersebut mengakibatkan roda terkunci (*wheel lockup*). Roda terkunci dapat menyebabkan hilangnya kontrol terhadap kemudi kendaraan dan memperpanjang jarak pemberhentian kendaraan yang mana hal tersebut merupakan keadaan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, ABS akan memanipulasi slip pada roda, sehingga dapat melakukan gesekan maksimum dengan jalan dan menstabilkan kemudi kendaraan.

Berdasarkan tujuan utama adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan (Harifi, Aghagolzadeh, Alizadeh, & Sadeghi, 2005). Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi salah satu faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum.

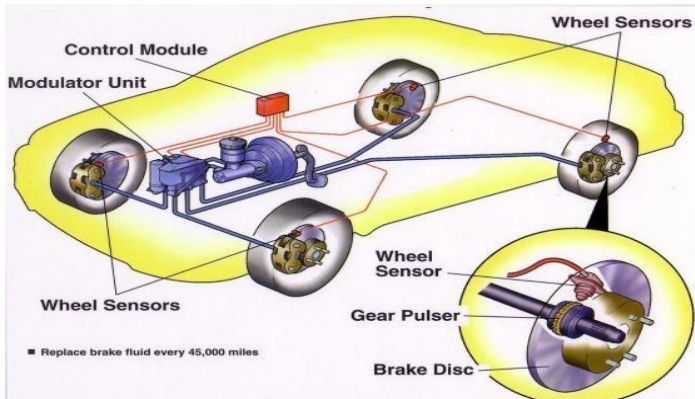
Adanya kebutuhan akan stabilitas dan ketahanan dari kendaraan yang dapat mempengaruhi ABS ini menjadikan kestabilan dari kendaraan adalah faktor yang penting untuk posisi kendaraan ketika proses pengereman terjadi. Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS seperti pada Gambar 2.2 saat terjadi proses pengereman dan permukaan jalan yang licin dibutuhkan gaya gesekan maksimum untuk memperlambat dan menghentikan kendaraan, sehingga dengan kondisi permukaan jalan seperti itu kendaraan mobil yang tidak menggunakan ABS tidak akan mendapatkan gaya gesekan

maksimum dikarenakan gaya pengereman lebih besar disatu sisi kendaraan saja, daripada disisi lainnya. Ketika menerapkan rem penuh pada kedua sisi dari kendaraan akan menghasilkan momen mengayuh atau meluncur yang dapat menarik kendaraan ke sisi yang memiliki gaya gesekan tinggi dan mengakibatkan ketidakstabilan kendaraan. Menjaga slip kedua roda belakang maupun depan pada tingkat yang sama dan meminimalkan dua koefisien gesekan puncak adalah konsep dari ABS ini (Harifi, Aghagolzadeh, Alizadeh, & Sadeghi, 2005).



Gambar 2.2. Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS (Motors, 2015)

Ketahanan kendaraan saat pengereman penting tidak hanya untuk koreksi ringan saja, tetapi untuk kemungkinan ketika pengemudi menghadapi rintangan. Kendaraan yang dilengkapi ABS, kinerja ban sangat penting, karena semua gaya pengereman dan kemudi dihasilkan di dalam ban dari bagian kontak antara kendaraan dan jalan. *Tractive force* pada ban dapat dihasilkan ketika ada perbedaan antara kecepatan lingkaran ban dan kecepatan relatif kendaraan terhadap permukaan jalan. Perbedaan tersebut dilambangkan sebagai slip. Hal ini biasa terjadi untuk menghubungkan gaya pengereman ban terhadap gaya slip ban. Setelah titik mencapai titik puncak, slip roda yang meningkat menyebabkan reduksi koefisien gesekan ban terhadap jalan. Sehingga, ABS harus membatasi slip ke nilai di bawah nilai titik puncak untuk mencegah terjadinya penguncian roda (Wabco, 1999). Pada ABS terdapat beberapa komponen utama seperti yang ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 2.3. Komponen ABS dengan rem hidraulik (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011)

2.1.1 Sensor Kecepatan Roda

Sensor kecepatan pada roda merupakan elemen *sensing* kecepatan rotasi ban dari sistem ABS yang tersegel rapat dan biasanya terletak di ujung roda. Kendaraan yang menggunakan ABS pada umumnya memiliki empat sensor dan terletak pada pinggir roda di tiap sisi as. Mengenai peletakan sensor bergantung pada tipe suspensinya. Secara khusus, sensor pada kendaraan bersuspensi spring diletakkan pada as ganda bagian depan, sedangkan pada kendaraan bersuspensi udara (*air suspension*), sensor diletakkan pada bagian belakang. Keluaran dari sensor ini kemudian diteruskan ke *electronic control unit* (ECU) untuk menentukan kapan ABS akan diaktifkan. Adapun dua tipe sensor yang dapat digunakan, antara lain: sensor sudut kanan dan sensor lurus.

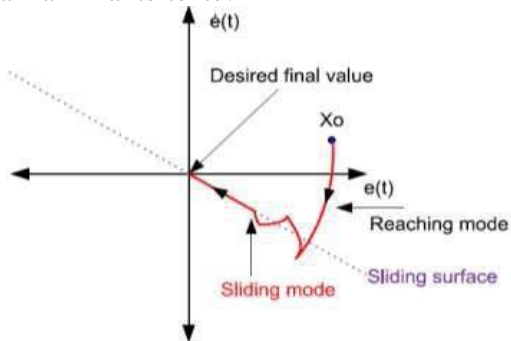
2.1.2 *Electronic Control Unit* (ECU)

ECU adalah bagian yang bertugas untuk memproses fungsi dari ABS. Secara umum ECU bertugas untuk menerima, menguatkan dan menyaring sinyal yang dikirim oleh sensor untuk menghitung kecepatan dan akselerasi roda, lalu secara logic memutuskan roda ketika hendak mengunci dan mengaktifkan *valve*

ABS pada kondisi dan waktu tertentu. Pada saat *valve* aktif, ECU dapat mengatur tekanan udara yang menuju ruangan rem. ECU dengan menggunakan kabel dapat menghubungkan antara komponen-komponen ABS lainnya seperti, *wheel sensor*, *modulator unit*, *power source*, *ground*, dan lain sebagainya.

2.2 Sliding Mode Control (SMC)

Sliding Mode Control (SMC) adalah metode kontrol nonlinier yang mengubah dinamika sistem nonlinier yang memaksa sistem untuk "meluncur" sepanjang penampang perilaku normal sistem. SMC dikenal dengan ketahanannya pada *high tracking trajectory* dan *robust* untuk mengestimasi paramater, diagnosis kesalahan, dan kontrol. Metode SMC ini dikembangkan agar dapat membuat sistem kontrol pada model yang kompleks dengan dinamik non-linear derajat tinggi yang bekerja pada keadaan tidak tentu (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016). SMC diterapkan pada ABS untuk melakukan *feedback* on-off berskala tinggi dalam penentuan aliran tekanan fluida pada distribusi tiap-tiap rem. SMC bekerja dengan cara mengendalikan *trajectory state* suatu sistem untuk menuju suatu permukaan luncur (*sliding surface*) dan mempertahankan nilai tertentu.



Gambar 2.4. Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

Gambar 2.4 menunjukkan representasi grafis dari SMC menggunakan fase-bidang, yang terdiri dari kesalahan ($e(t)$) dan turunannya ($\dot{e}(t)$). Dapat dilihat bahwa mulai dari kondisi awal,

lintasan keadaan (*trajectory state*) mencapai permukaan dalam waktu yang terbatas (*reaching mode*), dan kemudian meluncur di sepanjang permukaan menuju target (*mode geser*).

Langkah pertama dalam merancang SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan geser (*sliding surface*). Pada *Sliding Mode*, sistem dinamik dibatasi oleh persamaan permukaan. Langkah kedua, *Feedback Control Law* diperlukan untuk memberikan konvergensi lintasan sistem ke *Sliding Surface*. Gerakan sistem pada permukaan geser disebut *Sliding Mode* (Holkar & Waghmare, 2013). *Sliding Surface* dapat ditentukan dengan persamaan (2.3).

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (2.3)$$

λ_{des} merupakan nilai *slip ratio* yang menghasilkan gaya gesek maksimal dan persamaan eror dari *slip ratio* didefinisikan sebagai $e = \lambda_{des} - \lambda_i$, jadi kontroler seharusnya meminimalisir nilai eror (Rajendran, Spurgeon, Tsamparduokas, & Hampson, 2018).

Sinyal Kontrol SMC terdiri dari *equivalent control* dan *switching control* dimana aksi kontrol sesuai dengan *sliding phase* dan *reaching phase*. Struktur kontrol SMC direpresentasikan persamaan (2.4).

$$u_{SMC} = u_{eq} - \lambda_{sw} \quad (2.4)$$

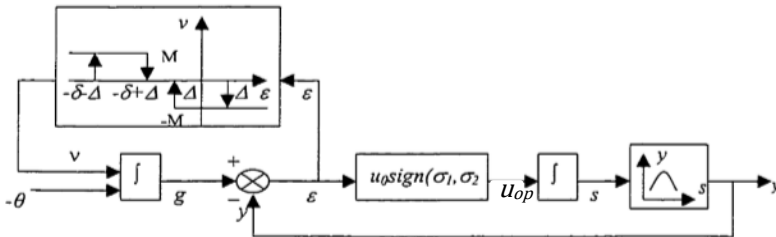
Dalam fase *sliding mode*, *tracking error* akan menuju ke titik kesetimbangan dan *sliding surface* seharusnya $s(t) = \dot{s} = 0$ dimana pada situasi ini *tracking error* terperangkap pada *sliding surface* (Ghozali, Sam, Rahmat, Hasyim, & Zulfatman, 2011).

2.5 Sliding Mode Optimization

Supervisory Control merupakan istilah yang menggambarkan suatu kontrol pengawasan yang mengacu pada peninjauan seluruh sistem operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi yang bertujuan untuk memperbaiki performansi dari suatu

sistem, nilai ekonomis, dan keandalan sistem tersebut. *Supervisory Control* memiliki beberapa fungsi antara lain, pemilihan strategi kontrol dari sistem, penggabungan sensor, memunculkan sinyal referensi, memonitoring adanya kerusakan, mendeteksi adanya gangguan, dan memonitoring performansi dari mesin. Pada penelitian ini digunakan *sliding mode optimization* sebagai *Supervisory Control* untuk menentukan nilai *slip ratio* optimal pada pengereman.

Metode algoritma *Sliding Mode Optimization* pertama kali diusulkan oleh (Korovin & Utkin, 1974). Diagram blok dari optimizer dapat dilihat pada Gambar 2.5.



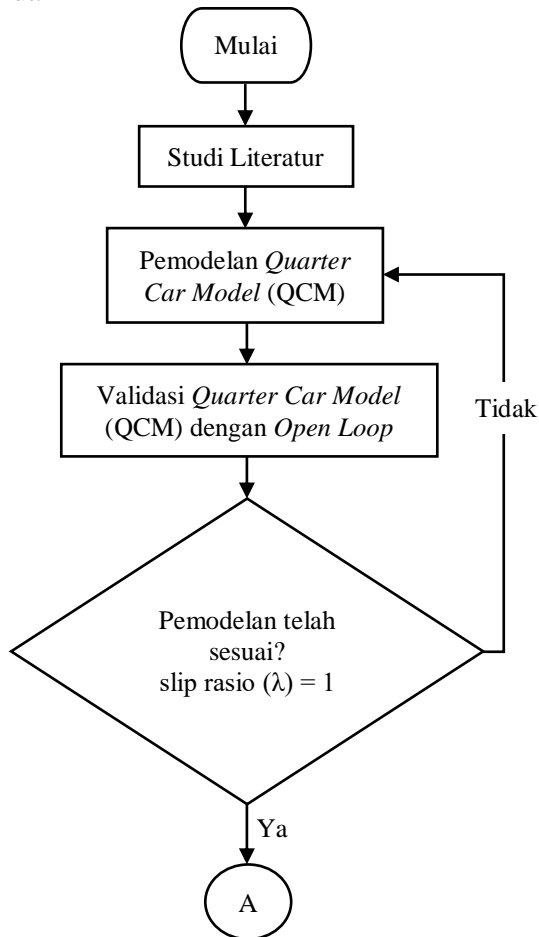
Gambar 2.5. *Sliding Mode Optimization* (Fu, 2000)

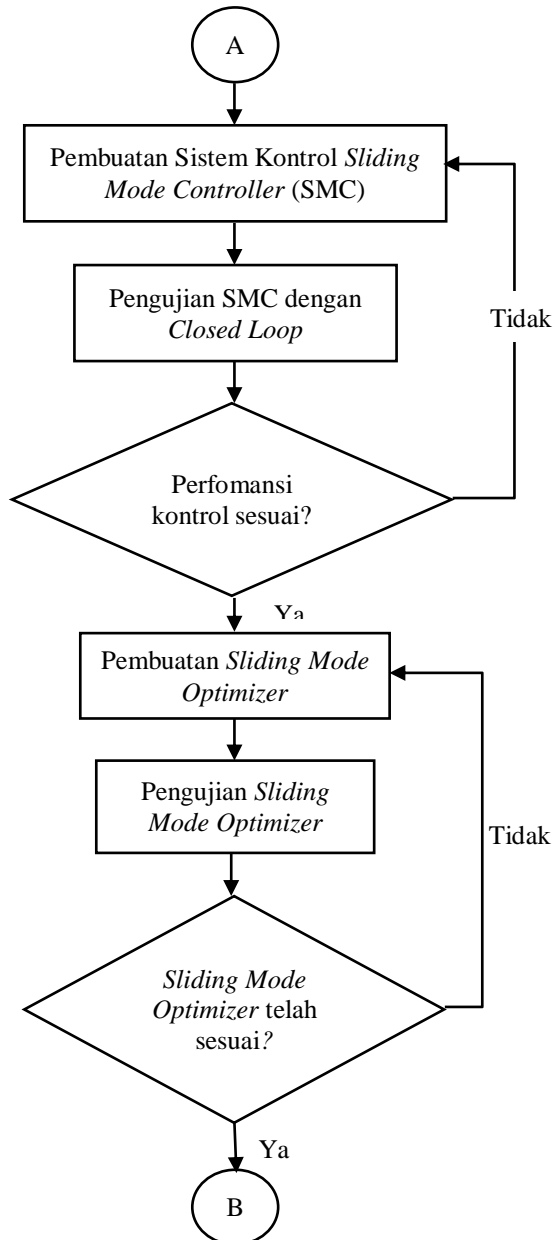
Pada *Sliding Mode Optimization* terdapat fungsi y yang merupakan variabel yang dioptimasi dan \dot{g} merupakan selisih dari fungsi v dan konstanta *design parameter* θ . *Input* dari fungsi v adalah *epsilon* (ϵ) yang digunakan untuk *tracking error* sedangkan *output*-nya merupakan 3 posisi v , yaitu M , $-M$, dan nol. Pada saat *epsilon* bernilai antara $-\Delta$ dan Δ maka *output* v adalah $-M$. Ketika *epsilon* bernilai antara $-\delta-\Delta$ dan $-\delta+\Delta$ maka *output* v adalah M . Selain dua keadaan tersebut, maka *output* v bernilai nol. Persamaan posisi fungsi v dapat dituliskan pada persamaan (2.5).

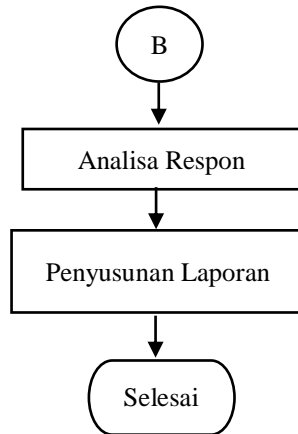
$$v = \begin{cases} M & (-\delta - \Delta) \leq \epsilon \leq (-\delta + \Delta) \\ -M & -\Delta < \epsilon < \Delta \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.5)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III berisi mengenai metodologi penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini yang dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut.





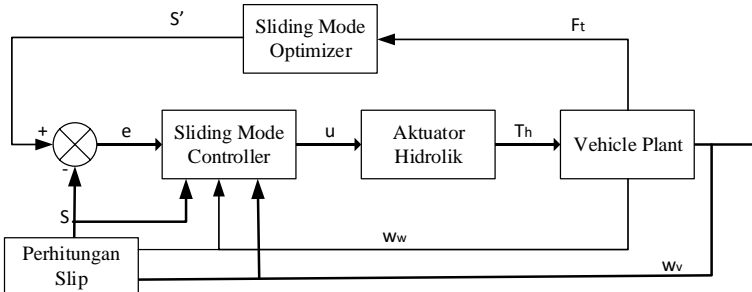


Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

Tahap studi literatur pada tugas akhir ini dimaksud untuk membangun pemahaman awal sampai mendalam secara teoritis terhadap materi yang mendukung penelitian tugas akhir ini dengan mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai tugas akhir.

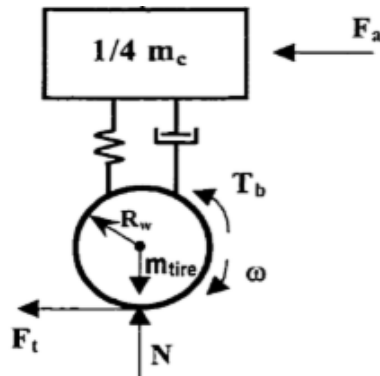
3.1 Pemodelan *Quarter Car Model* (QCM)

Berdasarkan berbagai penelitian yang sudah dilakukan dan, Anti-Lock Braking System (ABS) memiliki tiga model matematis yaitu quarter car, half car, dan full car models, sedangkan untuk tugas akhir ini menggunakan quarter car model, dimana quarter car model adalah representasi dari mobil dengan satu roda. Quarter car model diasumsikan ketiga roda lainnya memiliki karakteristik dan sistem yang sama dengan satu roda. Pemodelan keseluruhan sistem quarter car model ABS ini tampak pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram blok *Anti-Lock Braking System*

Pemodelan *Quarter Car Model* menggunakan hanya satu roda saja yang mewakili keseluruhan. Pemodelan ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol ABS dasar yang dikembangkan. Pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem pengereman pada quarter car model digunakan Hukum Newton II. Persamaan (3.1) menunjukkan Hukum Newton II yang menyatakan bahwa percepatan benda selalu berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada suatu benda dan berbanding terbalik dengan massa benda.



Gambar 3.3. Pemodelan Quarter Car

Gaya-gaya yang bekerja pada sistem pengereman untuk quarter car model ditunjukkan dengan Gambar 3.3 antara lain, gaya

gesek lintasan (F_t), gaya aerodynamic resistance (F_a), dan gaya pengereman pada roda (F_b). Persamaan gaya yang terjadi ditunjukkan dengan persamaan (3.1).

$$m \cdot a = \sum F \quad (3.1)$$

$$m \cdot \dot{V} = -F_t - F_a \quad (3.2)$$

Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

$$F_t = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.3)$$

$$F_a = Ca \cdot v^2 \quad (3.4)$$

Dimana :

m = Massa kendaraan quarter car model

F_t = Gaya gesek lintasan

F_a = Gaya aerodinamis

V = Kecepatan kendaraan

Tabel 3.1. Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
m	Massa <i>quarter car model</i>	342,5 kg
	Massa <i>full car model</i>	1370 kg
g	Gaya gravitasi	9,8 m/s ²
Ca	Konstanta aerodinamis	0,2921

3.3.1 Pemodelan Aktuator Rem Hidrolik

Langkah pertama dalam pemodelan sistem ini, diasumsikan sinyal kontrol u yang diberikan pada valve akan secara proporsional berpengaruh pada posisi spool valve. Dengan mengabaikan terjadinya kebocoran pada valve, ditemukan hubungan sinyal kontrol dengan besar aliran cairan rem yang dialirkan melalui control valve (Sohl & Bobrow, 1999).

$$q_1 = \begin{cases} cu\sqrt{p_s - p_1} & u \geq 0 \\ cu\sqrt{p_1 - p_r} & u < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$q_2 = \begin{cases} -cu\sqrt{p_2 - p_r} & u \geq 0 \\ -cu\sqrt{p_s - p_2} & u < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Dimana :

q_1 = aliran cairan silinder utama

q_2 = aliran cairan ruangan pendorong

p_s = tekanan sumber

p_r = tekanan reservoir

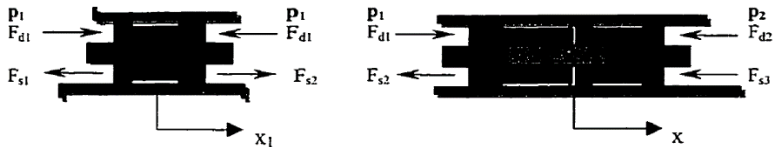
u = sinyal kontrol yang diberikan pada spool valve

p_1 = tekanan pada silinder utama

p_2 = tekanan pada ruangan pendorong

c = koefisien *valve orifice*

Silinder hidraulik dapat dibagi menjadi dua rangkaian berbeda seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Dinamika sistem pengereman (Fu, 2000)

Dengan mengabaikan inersia kecil dari piston, tekanan pada silinder utama dan ruang pendorong dapat ditemukan dengan persamaan (3.7).

$$\begin{aligned} p_1 &= F_{d1}/A_1 \\ p_2 &= F_{d2}/A_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dimana :

F_{d1} = gaya hidraulik pada silinder utama

F_{d2} = gaya hidraulik pada ruang pendorong

A_1 = luas piston pada silinder utama

A_2 = luas piston pada ruang pendorong

Dengan menggunakan hukum Newton II, persamaan gerak dari piston dapat ditulis sebagaimana persamaan (3.8).

$$F_{d1} - F_{d2} - F_{s2} - F_{s3} = m\ddot{x} \quad (3.8)$$

Dimana :

F_{s1} = gaya pegas pada ruang pertama silinder utama

F_{s2} = gaya pegas pada ruang kedua silinder utama

F_{s3} = gaya pegas pada ruang pendorong

m = massa batang pendorong dan piston pada ruang pendorong

x_1 = posisi piston pada silinder utama

x = posisi piston pada ruang pendorong

k = konstanta pegas

Gaya balik masing-masing pegas ditunjukkan pada persamaan (3.9).

$$\begin{aligned} F_{s1} &= kx_1 \\ F_{s2} &= k(x - x_1) \\ F_{s3} &= kx \end{aligned} \quad (3.9)$$

Efek inersia dari gerak piston pada silinder utama cukup kecil dibandingkan dengan gaya-gaya yang berlaku pada silinder utama. Dengan mengabaikan gaya inersia ini, didapatkan persamaan (3.10) (Fu, 2000).

$$F_{s2} - F_{s1} = 0 \quad (3.10)$$

Dengan substitusi persamaan (3.9), didapatkan persamaan (3.11).

$$x_1 = \frac{1}{2}x \quad (3.11)$$

Sehingga gaya balik pegas dapat ditulis sebagaimana persamaan (3.12).

$$\begin{aligned} F_{s1} &= F_{s2} = \frac{1}{2}kx \\ F_{s3} &= kx \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dinamika fluida hidrolik diterapkan pada silinder utama dan ruang pendorong maka diperoleh persamaan (3.13).

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= \frac{\beta}{v_1}(-\dot{x}A_1 + q_1) \\ \dot{p}_2 &= \frac{\beta}{v_2}(\dot{x}A_2 + q_2) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Kontrol yang diterapkan pada spool valve berbanding lurus dengan posisi spool seperti yang diilustrasikan dalam persamaan (3.5) dan (3.6). Mengganti persamaan-persamaan ini ke dalam persamaan dinamika fluida (3.13), diperoleh persamaan (3.14) dan persamaan (3.15).

$$\dot{p}_1 = \begin{cases} \frac{\beta}{v_1}(-A_1\dot{x} + cu\sqrt{p_s - p_1}) & u \geq 0 \\ \frac{\beta}{v_1}(-A_1\dot{x} + cu\sqrt{p_1 - p_r}) & u < 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\dot{p}_2 = \begin{cases} \frac{\beta}{v_2}(A_2\dot{x} - cu\sqrt{p_2 - p_r}) & u \geq 0 \\ \frac{\beta}{v_2}(A_2\dot{x} - cu\sqrt{p_s - p_2}) & u < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Gaya fluida dan gaya pegas yang bekerja pada piston di ruang pendorong menghasilkan persamaan (3.16).

$$F = F_{d1} + F_{d2} - F_{s2} - F_{s3} \quad (3.16)$$

Sehingga gaya hidrolik sebagaimana persamaan (3.17).

$$F = P_1A_1 - P_2A_2 - \frac{3}{2}kx \quad (3.17)$$

Gaya fluida akan diteruskan ke kaliper dengan persamaan (3.18).

$$\frac{T_b}{p_c - p_0} = K_t e^{-t_0 s} \quad (3.18)$$

Dimana:

T_b = torsi pengereman

P_c = tekanan Kaliper

P_0 = tekanan awal

K_t = konstanta torsi spesifik

t_0 = waktu tunda

Tabel 3.2. Parameter pemodelan aktuator hidrolik (Fu, 2000)

Parameter	Deskripsi	Nilai
p_s	Tekanan Sumber	$6895 \times 10^2 \text{ kPa}$
p_r	Tekanan reservoir	$100 \times 10^2 \text{ kPa}$
c	Koefisien valve orifice	1
K	Koefisien pegas	2200 N/m
β	Modulus bulk cairan	$6,5 \times 10^5 \text{ kPa}$
V_1	Volume cairan awal pada silinder utama	155 cm^3
V_2	Volume cairan awal pada ruangan pendorong	83 cm^3

3.3.2 Pemodelan Roda

Roda berfungsi untuk menghubungkan torsi eksternal dengan gerakan longitudinal kendaraan. Pada saat proses pengereman secara mendadak, maka diperoleh kecepatan tangensial permukaan roda dan kecepatan pada permukaan jalan yang berbeda sehingga terjadi slip atau tergelincir. Pengontrol ABS harus mengontrol dinamika rem dan dinamika roda. Model gerak rotasi roda diberikan oleh persamaan (3.19) (Fu, 2000).

$$F_t R_w - T_b = J_w \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

Dengan:

R_w = jari-jari roda

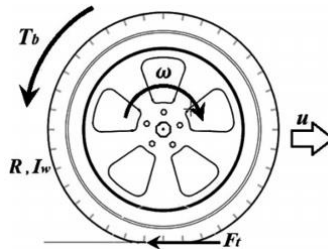
T_b = torsi pengereman

J_w = momen inersia roda

ω = kecepatan angular roda

Tabel 3.3. Parameter pemodelan roda pada gaya pengereman (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
m	Massa <i>quarter car model</i>	342,5 kg
	Massa <i>full car model</i>	1370 kg
g	Gaya gravitasi	9,8 m/s ²
R_w	Jari-jari putaran roda	0,33 m
J_w	Momen inersia roda	3,5 kg.m ²



Gambar 3.5. Dinamika yang bekerja pada *quarter car model* (Mirzaenejad & Mirzaei, 2014)

Gaya gesek lintasan diberikan persamaan (3.20).

$$F_t = \mu N \quad (3.20)$$

Dimana :

μ = koefisien gesek

N = gaya Normal

Maka persamaan gaya normal ditunjukkan pada persamaan (3.21).

$$N = m_t g \quad (3.21)$$

Berdasarkan, perhitungan koefisien gaya pengereman antara roda dengan jalan μ ditunjukkan melalui persamaan (3.22) berikut ini.

$$\mu(\lambda, v) = (C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda)e^{-C_4\lambda v} \quad (3.22)$$

Dimana:

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Bentuk kurva gesekan

C_3 = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$

C_4 = Nilai karakteristik kebasahan jalan

Tabel 3.4. Parameter koefisien gesekan pada permukaan jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014) (Ling & Lang, 2012)

Kondisi Jalan	C_1	C_2	C_3	C_4	S_{opt}
Aspal Kering	1,029	17,16	0,523	0,03	0,2
Aspal Basah	1,1973	25,168	0,5373	0,03	0,13

Pemodelan gerak longitudinal kendaraan untuk *quarter car model* diperlukan informasi *slip ratio*. Berikut merupakan persamaan dari *slip ratio* yang ditunjukkan melalui persamaan (3.23).

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (3.23)$$

Dimana:

ω = kecepatan sudut pada roda (*rad/s*)

R = jari – jari putaran roda (*m*)

V = kecepatan kendaraan (*m/s*)

3.2 Pembuatan Sistem Kontrol *Sliding Mode Controller* (SMC)

Perancangan *Sliding Mode Controller* menggunakan *simulink MATLAB R2014a* dalam blok sistem pengendalian *close loop*. Hal pertama yang dilakukan untuk merancang *Sliding Mode Controller* adalah menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*) agar dapat memenuhi spesifikasi dari desain *plan*. Selanjutnya adalah dengan merekonstruksi *gain switched feedback* agar dapat mengendalikan *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Persamaan (3.2) dan (3.3) merepresentasikan model matematis dari gerak longitudinal kendaraan maupun gerak rotasi roda pada sistem ABS.

$$m \cdot a = \sum F \quad (3.24)$$

$$m \cdot \dot{v} = -(F_t + F_a) \quad (3.25)$$

$$F_t \cdot R - T_b = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.26)$$

Adapun persamaan *slip ratio* dapat didefinisikan sebagaimana persamaan (3.27).

$$\lambda_i = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.27)$$

Selanjutnya adalah persamaan (3.27) dideferensialkan menjadi persamaan (3.28).

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (3.28)$$

Kemudian persamaan (3.25) dan (3.26) disubstitusikan ke persamaan (3.28), sehingga menjadi persamaan (3.29).

$$\dot{\lambda}_i = \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_t - \frac{R\omega}{V^2} \frac{1}{m} F_t - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a \quad (3.29)$$

Untuk mendapatkan nilai *slip ratio* terukur (λ_i) yang sesuai dengan *slip ratio* yang diinginkan (λ_{des}), maka *slip ratio* digunakan

sebagai *sliding surface* yang didefinisikan sebagaimana persamaan (3.30).

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (3.30)$$

Dengan fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagaimana persamaan (3.31).

$$sgn(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Adapun persamaan *constant rate reaching law* dapat didefinisikan sebagaimana persamaan (3.32).

$$\dot{S} = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.32)$$

Dimana ε (epsilon) dan k adalah positif konstan. Setelah itu, persamaan (3.30) diturunkan. Kemudian persamaan (3.29) disubstitusikan ke persamaan (3.30). Hasilnya kemudian disubstitusikan ke persamaan (3.32), sehingga menghasilkan persamaan (3.33).

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{des} - \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_t + \frac{R\omega}{V^2} \frac{1}{m} F_t + \frac{R\omega}{m} \cdot C_a = \\ - \varepsilon sgn(S) - kS \end{aligned} \quad (3.33)$$

Untuk sinyal kontrol yang digunakan untuk pengendalian torsi dari sistem pengereman, sehingga T_{bi} digunakan sebagai output sinyal kontrol dari aktuator *hydraulic brake system*, maka persamaannya berubah menjadi persamaan (3.34).

$$\begin{aligned} T_b = R \cdot F_t + \frac{J \cdot \omega}{mV} F_t + \frac{J \cdot \omega \cdot V}{m} \cdot C_a + \frac{JV}{R} [\varepsilon sgn(\lambda_{des} - \\ \lambda_i) + k(\lambda_{des} - \lambda_i)] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Setelah itu, pengendalian torsi diubah menjadi pengendalian keseluruhan plant sehingga torsi diubah menjadi sinyal kontrol u .

Berdasarkan persamaan (3.5) dan (3.6), maka didapatkan persamaan (3.35).

$$q = cu\sqrt{\Delta p} = A\dot{x} \quad (3.35)$$

Oleh karena itu didapatkan persamaan (3.36).

$$\dot{x} = \frac{cu\sqrt{\Delta p}}{A} \quad (3.36)$$

$$p_s k_h = \frac{cu\sqrt{\Delta p}}{A} \quad (3.37)$$

Adapun persamaan sinyal u dapat didefinisikan sebagai persamaan (3.38).

$$u = \frac{p_s A}{k_h c \sqrt{\Delta p}} \quad (3.38)$$

Adapun dinamika pada kaliper didapatkan persamaan (3.39).

$$p_s = \frac{T_b}{K_t e^{-t_0 s}} + p_0 \quad (3.39)$$

Dengan substitusi persamaan 3.39 ke persamaan 3.38 maka didapatkan persamaan (3.40)

$$u = \frac{\left\{ \frac{T_b}{K_t e^{-t_0 s}} + p_0 \right\} A}{k_h c \sqrt{\Delta p}} \quad (3.40)$$

Dimana:

u = sinyal kontrol

A = luas piston

k_h = konstanta hidrolis

Δp = perbedaan tekanan

Kemudian dilakukan substitusi dengan persamaan (3.34) maka didapatkan persamaan (3.41).

$$u = \frac{\left\{ \frac{R \cdot F_t + \frac{J \cdot \omega}{mV} F_t + \frac{J \cdot \omega \cdot V}{m} \cdot C_a + \frac{J \cdot V}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{des} - \lambda_i) + k(\lambda_{des} - \lambda_i)]}{K_t e^{-t_0 s}} + p_0 \right\} A}{k_h c \sqrt{\Delta p}}$$

Tabel 3.5. Parameter pemodelan aktuator hidrolik (Fu, 2000)

Parameter	Deskripsi	Nilai
p_0	Tekanan rem awal	6,5 Pa
c	Koefisien valve orifice	1
K_t	Konstanta torsi spesifik	1,7
A	Luas piston	6,8 cm ²
k_h	Konstanta hidrolik	0,4
Δp	Perbedaan tekanan	75000 kpa

3.3 Pembuatan *Sliding Mode Optimization*

Supervisory Control merupakan istilah yang menggambarkan suatu kontrol pengawasan yang mengacu pada peninjauan seluruh sistem operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi yang bertujuan untuk memperbaiki performansi dari suatu sistem, nilai ekonomis, dan keandalan sistem tersebut. *Supervisory Control* memiliki beberapa fungsi antara lain, pemilihan strategi kontrol dari sistem, penggabungan sensor, memunculkan sinyal referensi, memonitoring adanya kerusakan, mendeteksi adanya gangguan, dan memonitoring performansi dari mesin. Pada penelitian ini digunakan *sliding mode optimization* sebagai *Supervisory Control* untuk menentukan nilai *slip ratio* optimal pada pengereman.

Sistem kontrol pengereman yang menggunakan slip sebagai sinyal umpan balik untuk mengendalikan ABS terbukti memperpendek jarak pengereman secara efektif, dan untuk meningkatkan kontrol dan stabilitas kendaraan saat rem diterapkan. Keseimbangan gaya pada kendaraan dapat ditulis sebagaimana persamaan (3.41).

$$F_t + F_a = \mu(s)mg + \frac{c_a v^2}{4} \quad (3.41)$$

Dalam persamaan di atas, koefisien adhesi jalan μ adalah fungsi unimodal dari slip roda. Dengan demikian, fungsi $\mu(s)$ hanya memiliki satu optimizer. Perhatikan bahwa persamaan kedua dari kanan membantu untuk meningkatkan gaya gesekan yang pada gilirannya mengurangi jarak berhenti. Oleh karena itu, optimalisasi gaya gesek mengarah ke optimalisasi suku pertama dalam persamaan (3.41) yang dinyatakan dengan persamaan (3.42).

$$F = \mu(s)mg \quad (3.42)$$

Pertama, F_t hanya memiliki satu titik kritis yang bertepatan dengan *maximizer* μ . Gaya gesek terbesar akan muncul pada slip s' yang diinginkan, oleh karena itu dapat ditemukan dari persamaan (3.43).

$$\left. \frac{dF}{ds} \right|_{s=s'} = 0 \quad (3.43)$$

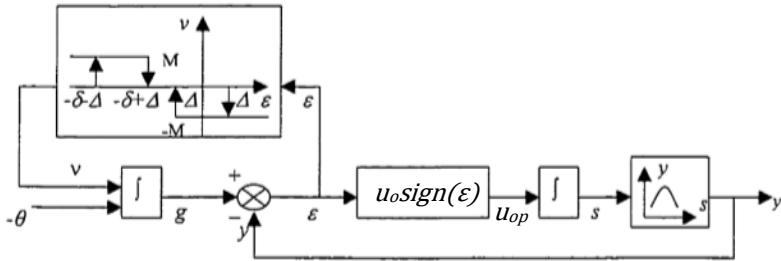
Oleh karena itu, $\frac{dF}{ds} = mg \frac{d\mu(s)}{ds} = 0$ hanya jika $\frac{d\mu(s)}{ds} = 0$, yang mana berarti F hanya memiliki satu titik kritis yang bertepatan dengan nilai μ maksimum.

Kedua, s' adalah *maximizer* dari F . Dengan menerapkan turunan kedua, maka didapatkan persamaan (3.44).

$$\left. \frac{d^2F}{ds^2} \right|_{s=s'} < 0 \quad (3.44)$$

Karenanya $\left. \frac{dF}{ds} \right|_{s=s'} = m_t g \frac{d\mu^2(s)}{ds^2} < 0$ hanya jika $\frac{d\mu^2(s)}{ds^2} < 0$. Hal ini berarti bahwa s' adalah *maximizer* dari F .

Metode algoritma *Sliding Mode Optimizer* pertama kali diusulkan oleh (Korovin & Utkin, 1974). Diagram blok dari *optimizer* dapat dilihat pada Gambar 3.6 yang mana definisi dari parameternya terdapat di Tabel 3.6



Gambar 3.6. *Sliding Mode Optimizer* (Fu, 2000)

Sistem *optimizer* dideskripsikan dengan set persamaan (3.45) (Will, Hui, & Zak, 1998).

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{F_t}{m} \\
 \dot{s} &= u_{op} \\
 u_{op} &= u_0 \text{sign}(\varepsilon) \\
 \varepsilon(t) &= g(t) - y(s) \\
 \dot{g} &= -\theta + v(\varepsilon)
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

Tabel 3.6. Parameter pada *Supervisory Control* (Will, Hui, & Zak, 1998)

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Switch gain	300
δ	Interval lebar eror	0,4
Δ	Lebar histerisis	0,025
u_0	Optimizer gain	2
θ	<i>Design parameter</i>	1

Pada *Sliding Mode Optimizer*, fungsi y merupakan variabel yang di optimasi. Fungsi y kemudian dicari nilai selisihnya dengan fungsi g sehingga menghasilkan nilai *tracking error* ε . Fungsi g merupakan integral selisih fungsi v dan *design parameter* θ . Nilai ε kemudian dimasukkan ke fungsi *signum* dan dikalikan

u_0 sehingga menghasilkan u_{op} . Nilai u_{op} kemudian diintegrasikan sehingga didapatkan nilai *Slip Ratio* yang optimal.

3.4 Pengujian *Supervisory Control* pada *Quarter vehicle*

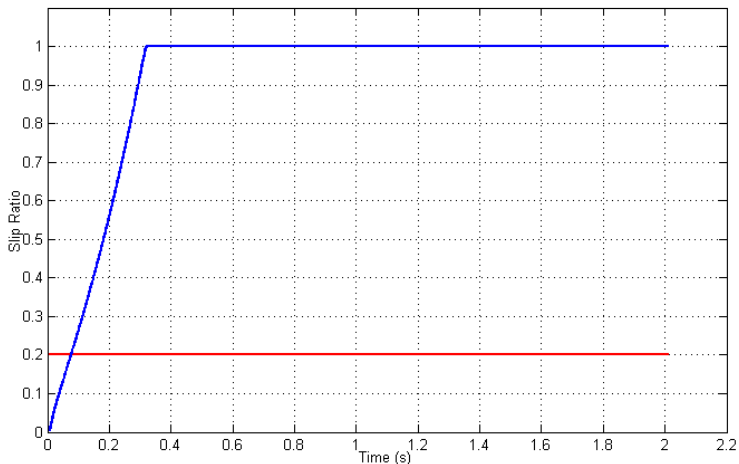
Pengujian *Supervisory Control* bertujuan agar dapat mengetahui sistem yang telah dirancang mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal pada berbagai kondisi jalan. Langkah awal yang dilakukan ialah dengan membuat pemodelan *quarter vehicle*. *Quarter vehicle* dapat dikatakan sesuai apabila menghasilkan nilai *slip ratio* 1 jika diberi sinyal konstan pada aktuator hidrolik. Selanjutnya dilakukan perancangan *Sliding Mode Control*. Untuk validasi SMC dilakukan pengujian pada kondisi jalan aspal basah dan aspal kering dengan pemberian nilai *set point* tertentu. Selain itu, SMC juga diuji pada perubahan nilai *set point* pada kondisi pengereman. Apabila nilai *slip ratio* telah sesuai, maka dilakukan penambahan *Sliding Mode Optimization* (SMO). Pada SMO, pengujian dilakukan dengan memberikan kondisi jalan aspal kering dan aspal basah. Selain itu juga dilakukan pengujian respon sistem terhadap perubahan jalan. Pengujian dinyatakan berhasil apabila sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* yang optimal sesuai dengan kondisi jalan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

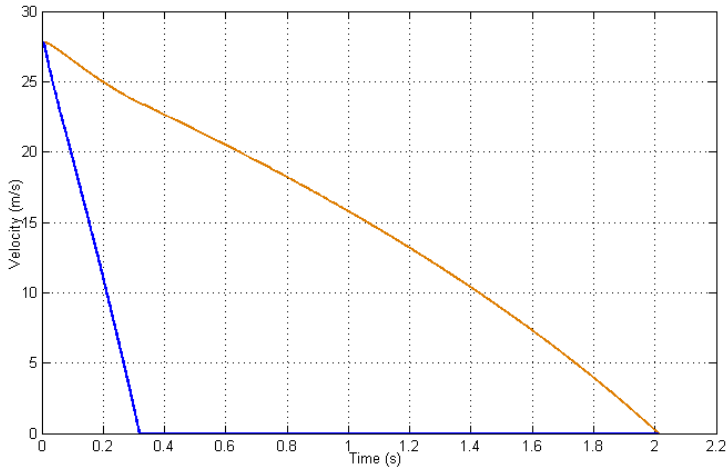
Bab IV akan menjelaskan mengenai hasil perancangan dari *Supervisory Control* pada sistem pengendalian torsi pengereman untuk *Anti-Lock Braking System* (ABS) yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan perangkat lunak *Matlab R2014a* yang selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Uji performansi dilakukan agar diketahui *Sliding Mode Control* dan *Supervisory Control* yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak untuk mendapatkan *slip ratio* yang optimal.

4.1 Uji Validasi Pemodelan *Quarter Car Model* (QCM)

Penelitian yang berbasis simulasi dengan *simulink Matlab R2014a*, pemodelan harus diuji dengan adanya tahapan validasi agar dapat memastikan pemodelan dari simulasi memperoleh respon simulasi penelitian yang benar sesuai pada jurnal acuan. Pengujian dilakukan dengan *open loop* tanpa ABS dengan masukan pada sistem berupa sinyal kontrol konstan dan dilakukan pada jalan aspal kering. Hasil simulasi tampak seperti Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1. Respon dari uji *open loop* pada simulasi



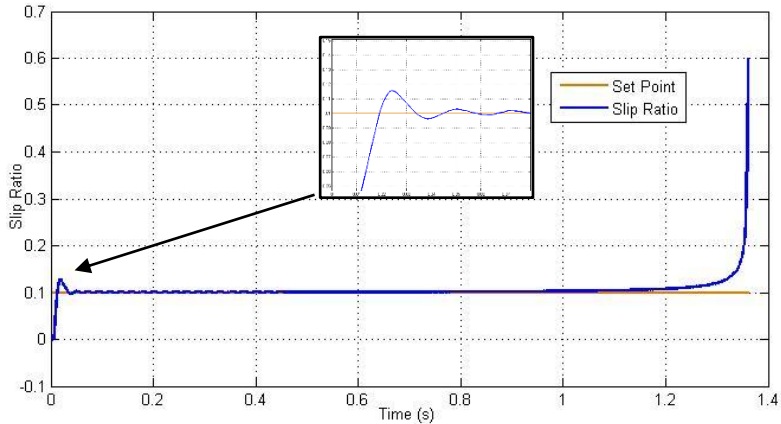
Gambar 4.2. Respon kecepatan kendaraan dan roda tanpa ABS

Hasil respon dari Gambar 4.1 menunjukkan bahwa *slip ratio* tanpa ABS stabil pada angka 1 yang berarti roda telah terkunci dan berhenti berputar sampai kecepatan mobil berakhir, saat terjadi pengereman. Ketika *slip ratio* bernilai 1, roda berhenti bergerak sedangkan mobil masih melaju sebagaimana pada Gambar 4.2. Hal ini mengakibatkan kendaraan tidak dapat bermanuver sehingga resiko kecelakaan semakin tinggi. Kendaraan berhenti pada detik ke - 2.0105 pada jarak 30,19 meter dengan kondisi roda terkunci sejak detik ke - 0.3184.

4.2 Uji Close Loop Menggunakan Sliding Mode Controller

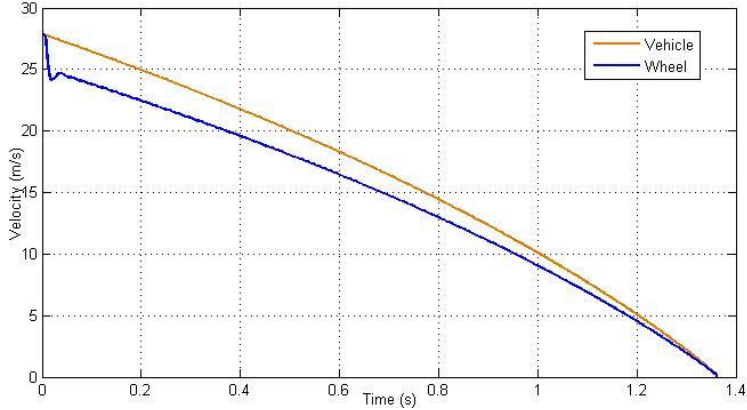
Uji *close loop* pada simulasi dibuat dengan menyerupai Gambar diagram blok 3.5 melalui *simulink* perangkat lunak *Matlab 2014a*. Pada pengujian ini dilakukan sebagai peninjau untuk respon pengendalian dari *slip ratio* dapat stabil di *Set point*. Pengujian *close loop* dilakukan menggunakan nilai *set point* 0,1 pada aspal kering dan 0,25 pada aspal basah serta *Sliding Mode Controller*

(SMC) dengan nilai $\varepsilon = 0,1$, $k = 100$ ke model *quarter car model* (QCM).



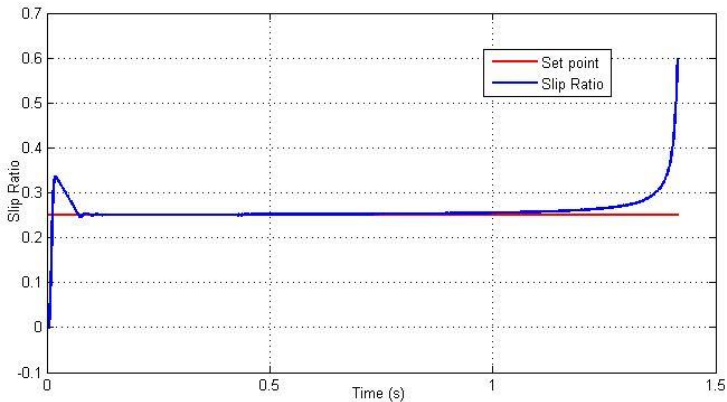
Gambar 4.3. Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* pengendalian *Sliding Mode Controller* dengan *set point* 0,1

Hasil grafik dari Gambar 4.3 menunjukkan bahwa respon berada disekitar *Set point* dan simulasi berhenti pada detik ke – 1,3613. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan pengereman kendaraan tanpa menggunakan ABS dengan selisih waktu berhenti kendaraan sebesar 0.6375 sekon. Maximum overshoot pada respon sistem sebesar 0,1157 atau 15,7%. Hasil ini cukup baik mengingat nilai Maximum Overshoot di bawah 20%. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria perfomansi kontrol dari *Set point* yaitu 0,1 pada kondisi aspal kering dan respon variabel stabil disekitar *Set point*. Hasil di atas membuktikan bahwa roda yang tidak terkunci mengakibatkan jarak berhenti yang lebih pendek, waktu pengereman yang lebih singkat, dan kendaraan masih dapat bermanuver dengan baik dikarenakan roda tidak terkunci. Hal ini tentu dapat meningkatkan keselamatan dan keamanan dalam berkendara.



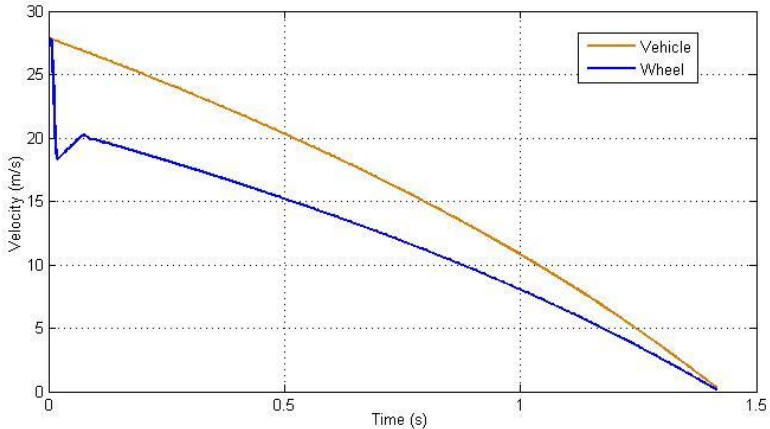
Gambar 4.4. Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan *set point* 0,1

Adanya ABS seperti pada Gambar 4.4 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan.



Gambar 4.5. Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* pengendalian *Sliding Mode Controller* dengan *set point* 0,25

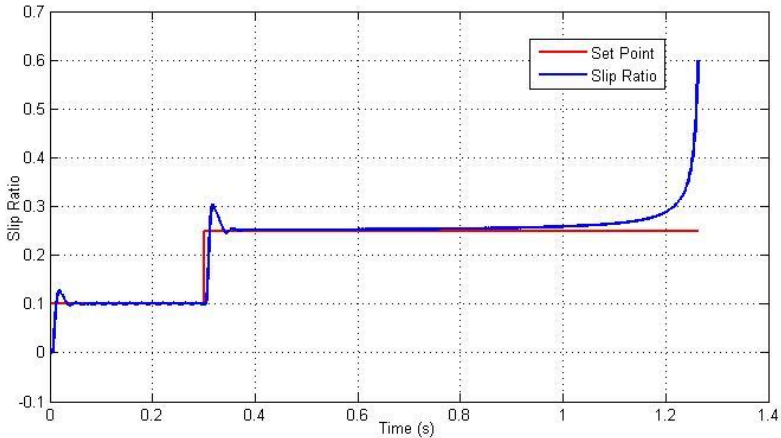
Hasil grafik dari Gambar 4.5 menunjukkan bahwa respon berada disekitar *Set point* dan simulasi berhenti pada detik ke – 1,4148. Maximum overshoot pada respon sistem sebesar 0,3365. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria perfomansi kontrol dari *Set point* yaitu 0,25 dan respon variabel stabil disekitar *Set point*.



Gambar 4.6. Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan *set point* 0,25

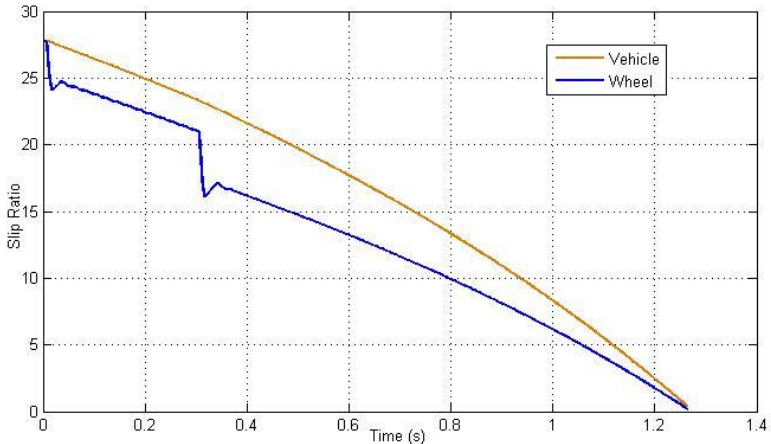
Adanya ABS seperti pada Gambar 4.6 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan.

Selain itu diperlukan pengujian dengan mengubah *set point* pada saat kendaraan belum berhenti. Hal ini diperlukan agar dapat diketahui respon sistem pada saat perubahan kondisi jalan. Pengujian dilakukan dengan menaikkan dan menurunkan nilai *set point* dengan nilai 0,1 dan 0,25 pada saat 0,3 sekon pada jalan aspal kering.



Gambar 4.7. Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* pengendalian *Sliding Mode Controller* dengan menaikkan *set point*

Hasil grafik dari Gambar 4.7 menunjukkan bahwa respon berada disekitar *set point* dan simulasi berhenti pada detik ke – 1,2637. Maximum overshoot pada respon sistem saat dari nol menuju ke *set point* 0,1 sebesar 0,1157 sedangkan maximum overshoot pada saat menuju *set point* 0,25 sebesar 0,3046. Dapat dilihat bahwa output sistem pengendali telah mampu mengikuti perubahan *set point* dari 0,1 ke 0,25 dan respon variabel stabil disekitar *set point*. Simulasi ini dilakukan pada kondisi jalan aspal kering. Hasil di atas membuktikan bahwa sistem pengendalian dengan menggunakan *Sliding Mode Control* bekerja dengan baik dan dapat diandalkan untuk pengendalian pada *Anti-lock Braking System*. Oleh karena itu, penelitian dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu perancangan *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer*. Simulasi dilakukan pada kondisi jalan aspal kering dan aspal basah.



Gambar 4.8. Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS dengan menaikkan *set point*

Adanya ABS seperti pada Gambar 4.8 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan. Selain itu, pada saat kenaikan *set point*, perbedaan kecepatan antara kendaraan dan roda semakin besar.

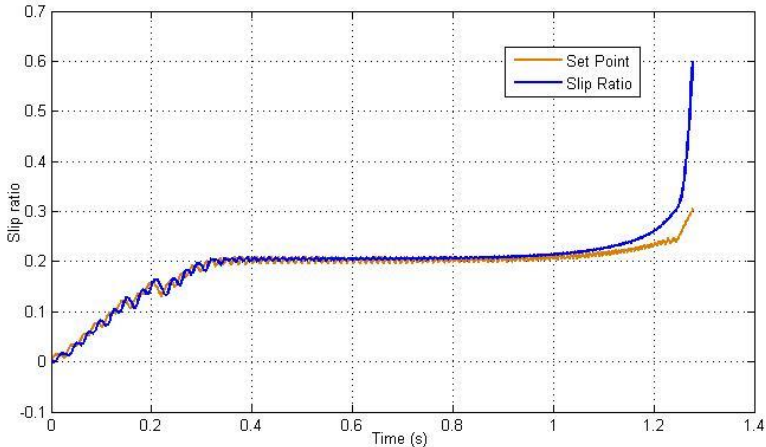
4.3 Uji Supervisory Control

Tahap ini dilakukan uji *Supervisory Control* pada *Quarter vehicle* dengan ABS. Uji *Supervisory Control* diberikan dengan memberikan beberapa kondisi jalan. *Supervisory Control* akan menentukan *slip ratio* optimum yang dinakan sebagai nilai *set point* pada *Sliding Mode Control*.

4.4.1 Uji Pada Jalan Aspal Kering

Pengujian *Supervisory Control* dengan menggunakan jalan aspal kering dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pengujian dilakukan

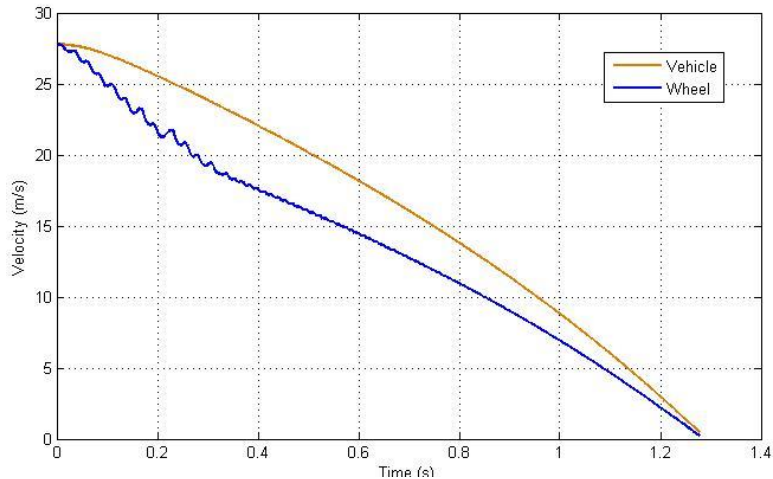
dengan menggunakan parameter koefisien gesekan C_1 sebesar 1,029, C_2 sebesar 17,16, C_3 sebesar 0,523, dan C_4 sebesar 0,03.



Gambar 4.9. Grafik respon dari hasil uji pada jalan aspal kering

Hasil grafik dari Gambar 4.9 menunjukkan bahwa *Supervisory Control* mampu menghasilkan output *set point* optimal yaitu 0,2. Respon sistem berada disekitar *set point* dan simulasi berhenti pada detik ke – 1,2776. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan waktu berhenti tanpa menggunakan *Supervisory Control* dengan *Set point* 0,1 pada jalan aspal kering dengan selisih waktu berhenti sebesar 0,0837 sekon. Untuk jarak pengereman, kendaraan berhenti pada jarak 20,98 meter. Hasil ini lebih baik dengan jarak berhenti kendaraan tanpa menggunakan ABS dengan selisih 9,21 meter. Hasil ini juga lebih baik jika dibandingkan dengan jarak berhenti tanpa menggunakan *Supervisory Control* dengan *set point* 0,1 pada jalan aspal kering dengan selisih jarak sebesar 0,77 meter. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria perfomansi kontrol dari *Set point*. Hasil ini menunjukkan bahwa *Supervisory Control* telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal pada kondisi jalan aspal kering. Selain itu, hasil di atas membuktikan bahwa sistem pengendalian dengan menggunakan *Sliding Mode Control* bekerja

dengan baik dan dapat diandalkan untuk pengendalian pada kondisi jalan aspal kering.

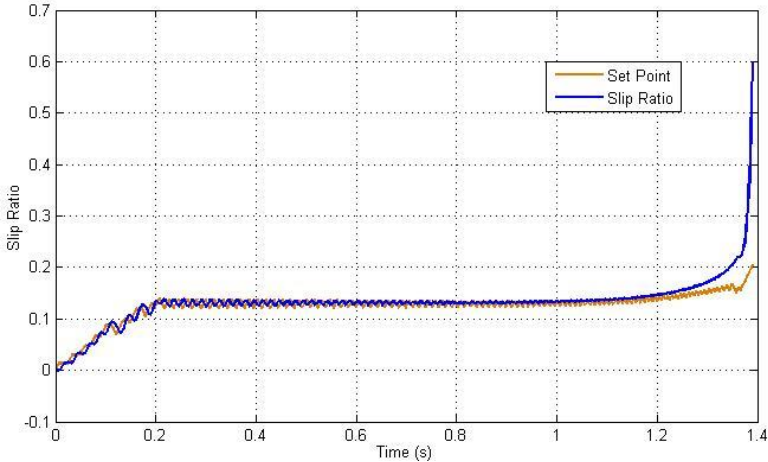


Gambar 4.10. Respon kecepatan kendaraan dan roda pada jalan aspal kering

Adanya ABS seperti pada Gambar 4.10 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan.

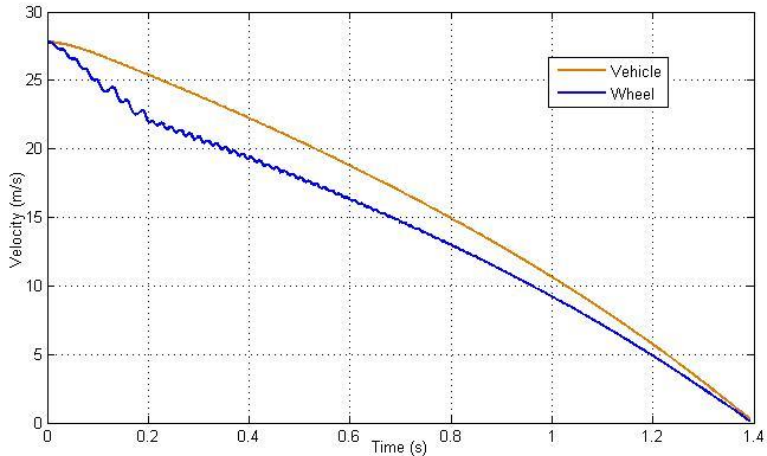
4.4.2 Uji Pada Jalan Aspal Basah

Pengujian *Supervisory Control* dengan menggunakan jalan aspal basah dapat dilihat pada Gambar 4.11. Pengujian dilakukan dengan menggunakan parameter koefisien gesekan C_1 sebesar 1,1973, C_2 sebesar 25,168, C_3 sebesar 0,5373, dan C_4 sebesar 0,03.



Gambar 4.11. Grafik respon dari hasil uji pada jalan aspal basah

Hasil grafik dari Gambar 4.11 menunjukkan bahwa *Supervisory Control* mampu menghasilkan output *Set point* optimal yaitu 0,13. Respon sistem berada disekitar *Set point* dan simulasi berhenti pada detik ke – 1,3907. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan waktu berhenti tanpa menggunakan *Supervisory Control* dengan *set point* 0,25 pada jalan aspal basah dengan selisih waktu berhenti sebesar 0,0241 sekon. Untuk jarak pengereman, kendaraan berhenti pada jarak 22,41 meter. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan jarak berhenti tanpa menggunakan *Supervisory Control* dengan *Set point* 0,25 pada jalan aspal basah dengan selisih jarak sebesar 0,01 meter. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria peromansi kontrol dari *set point*. Hasil ini menunjukkan bahwa *Supervisory Control* telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal pada kondisi jalan aspal basah. Selain itu, hasil di atas membuktikan bahwa sistem pengendalian dengan menggunakan *Sliding Mode Control* bekerja dengan baik dan dapat diandalkan untuk pengendalian pada kondisi aspal basah.



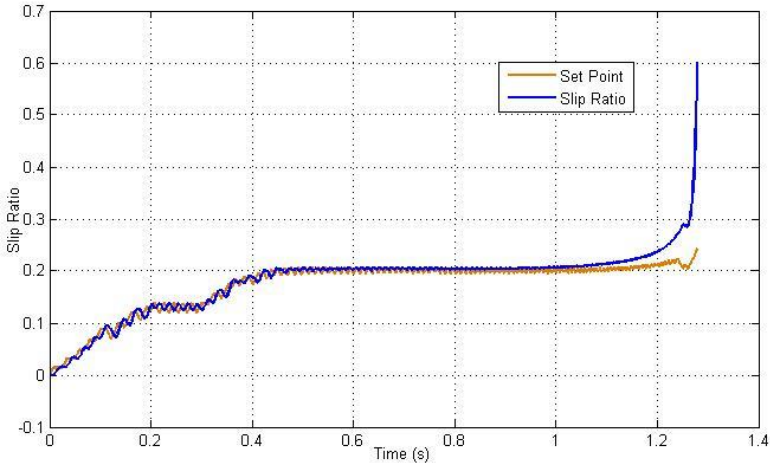
Gambar 4.12. Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS pada jalan aspal basah

Adanya ABS seperti pada Gambar 4.12 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan.

4.4.3 Uji Pada Perubahan Jalan

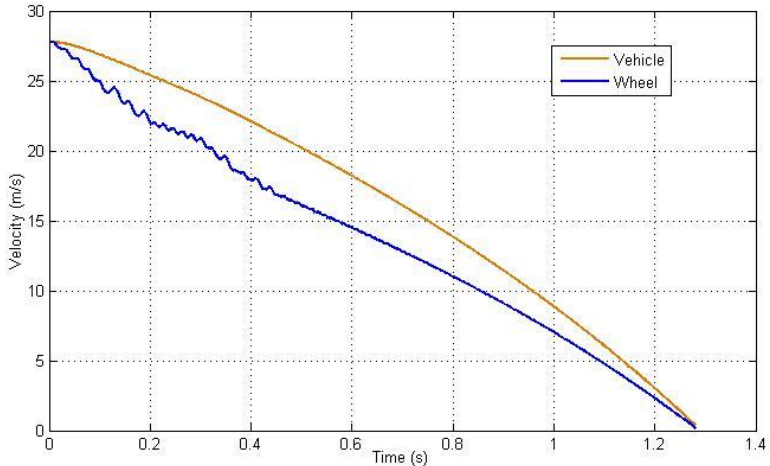
Pengujian *Supervisory Control* dengan menggunakan jalan aspal basah dapat dilihat pada Gambar 4.13. Pengujian dilakukan dengan menggunakan jalan aspal basah kemudian berubah menjadi aspal kering. Perubahan dilakukan pada detik ke 0,3. Parameter koefisien gesekan C_1 sebesar 1,1973, C_2 sebesar 25,168, C_3 sebesar 0,5373, dan C_4 sebesar 0,03 pada kondisi jalan aspal basah. Sedangkan untuk kondisi jalan aspal kering pengujian dilakukan dengan menggunakan parameter koefisien gesekan C_1 sebesar 1,1973, C_2 sebesar 25,168, C_3 sebesar 0,5373, dan C_4 sebesar 0,03. Untuk mengubah nilai koefisien gesekan pada simulasi, digunakan sinyal *Step* pada setiap nilai C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 dengan nilai awal

menggunakan parameter koefisien gesekan dengan kondisi aspal basah dan nilai akhir parameter koefisien gesekan kondisi jalan aspal kering serta *Step Time* pada detik ke $-0,3$.



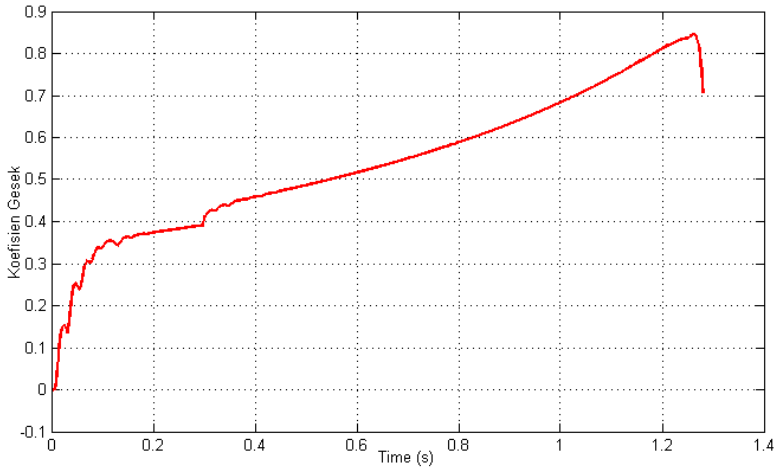
Gambar 4.13. Grafik respon dari hasil uji pada perubahan jalan

Hasil grafik dari Gambar 4.13 menunjukkan bahwa *Supervisory Control* mampu menghasilkan output *set point* optimal pada jalan aspal basah yaitu 0,13 dan aspal kering yaitu 0,2. Respon sistem berada disekitar *set point* dan simulasi berhenti pada detik ke $-1,2794$. Untuk jarak pengereman, kendaraan berhenti pada jarak 20,99 meter. Dapat dilihat bahwa *Supervisory Control* telah mampu mengikuti perubahan dari kondisi jalan aspal basah ke kondisi jalan aspal kering dan respon variabel stabil disekitar *set point*. *Supervisory Control* memiliki kepekaan yang baik pada perubahan kondisi jalan dikarenakan mampu mengubah nilai *set point* dalam waktu yang relatif singkat. Selain itu, hasil di atas membuktikan bahwa sistem pengendalian dengan menggunakan *Sliding Mode Control* bekerja dengan baik dan dapat diandalkan untuk pengendalian pada perubahan kondisi jalan dari aspal basah ke aspal kering.



Gambar 4.14. Respon kecepatan kendaraan dan roda pada perubahan jalan

Adanya ABS seperti pada Gambar 4.14 kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan. Selain itu, pada saat kenaikan *set point* pada detik ke-3, perbedaan kecepatan antara kendaraan dan roda semakin besar. Semakin besarnya nilai *set point* disebabkan perubahan kondisi jalan dari aspal basah ke aspal kering. Nilai *slip ratio* yang semakin besar akan menyebabkan kecepatan roda semakin kecil. Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda semakin lama akan semakin melambat hingga berhenti pada waktu yang hampir bersamaan.



Gambar 4.15. Nilai koefisien gesek pada uji perubahan jalan

Pada Gambar 4.15 terdapat grafik nilai koefisien gesek pada uji perubahan jalan. Pada saat perubahan jalan pada detik ke-3, nilai koefisien jalan semakin besar. Hal ini dikarenakan jalan aspal kering memiliki permukaan yang lebih kasar sehingga memiliki nilai koefisien gesek yang lebih besar jika dibandingkan dengan aspal basah.

Adapun perubahan dari kondisi jalan kering ke basah, *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer* tidak dapat menghasilkan nilai *slip ratio* optimal. Hal ini dikarenakan pada saat perubahan kondisi jalan, *Supervisory Control* menghasilkan refleksi nilai *epsilon* pada *Supervisory Level* yang lebih besar dibandingkan saat sebelumnya. Dampak refleksi dapat diminimalisir dengan mengurangi nilai pengurang dari *Output v*. Akan tetapi penurunan nilai pengurang akan menyebabkan *Output Supervisory Level* turun sehingga nilai *Set point* tidak lagi optimal.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan sistem *Supervisory Control* pada *Anti-Lock Braking System (ABS)* untuk *Quarter vehicle* adalah sebagai berikut:

- Perancangan sistem pengereman pada *Quarter vehicle* yang dirancang sudah mampu merepresentasikan *plant* yang telah dimodelkan. Hal tersebut ditunjukkan dengan pengujian *open loop* yang menghasilkan *slip ratio* dengan nilai 1 yang berarti bahwa roda terkunci.
- Perancangan sistem pengendali telah mampu membuat *slip ratio* sesuai dengan *set point*. Pada pengujian *closed loop* dengan nilai *set point* 0,1 didapatkan nilai *maximum overshoot* sebesar 0,1157 atau 15,7% dan berhenti pada detik ke – 1,3613.
- Pada pengujian *closed loop* dengan nilai *set point* 0,25 didapatkan nilai *maximum overshoot* sebesar 0,3365 dan berhenti pada detik ke – 1,4148. Pada pengujian *close loop* dengan mengubah nilai *set point* 0,1 ke 0,25 kendaraan berhenti pada detik ke – 1,2637.
- Perancangan *Supervisory Control* telah mampu untuk menghasilkan output *slip ratio* yang optimal. Hal ini ditunjukkan dengan pengujian *Supervisory Control* pada jalan aspal kering dan aspal basah. Pada jalan aspal kering, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,2. Respon sistem berada disekitar *set point* dan berhenti pada detik ke – 1,2776.
- Pada jalan aspal basah, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,13. Respon sistem berada disekitar *set point* dan berhenti pada detik ke – 1,3907.
- Pada pengujian perubahan jalan, sistem telah mampu menghasilkan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0,13 dan 0,2.

Respon sistem berada disekitar *Set point* dan berhenti pada detik ke – 1,2794.

5.2 Saran

Adapun terdapat beberapa saran dalam proses tugas akhir ini untuk digunakan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Pemodelan ABS dengan menggunakan pemodelan 4 roda dan menambahkan keadaan pada kondisi berbelok dan menurun.
- Membandingkan *Supervisory Control* berbasis *Sliding Mode Optimizer* dengan algoritma yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

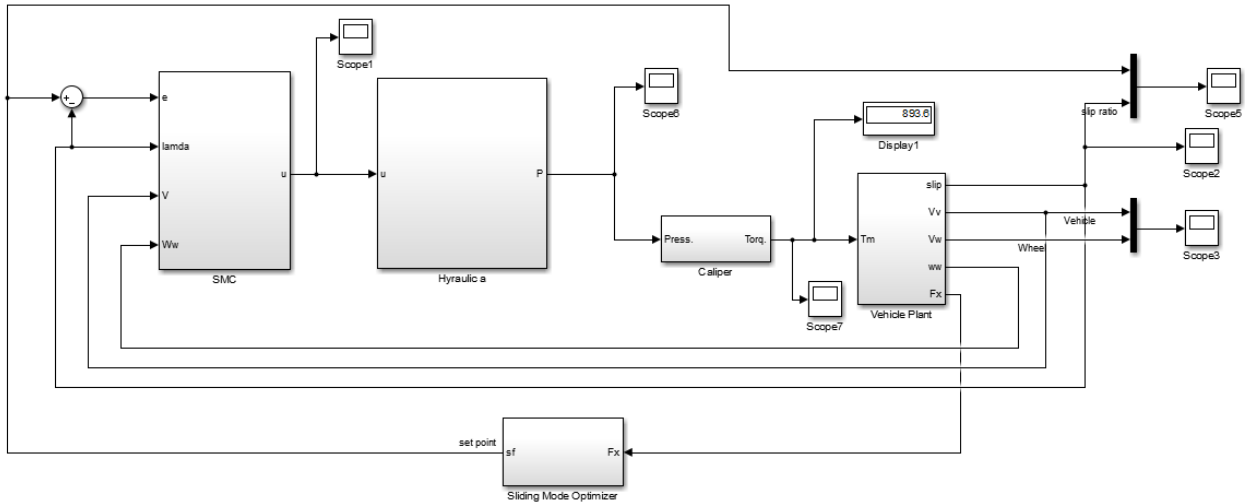
- Aly, A. A., Zeidan, E.-S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 186-195.
- Biro Komunikasi dan Informasi Publik Kementerian Perhubungan. (2017, Agustus 22). *Rata-rata Tiga Orang Meninggal Setiap Jam Akibat Kecelakaan Jalan*. Diambil kembali dari Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia:
https://kominfo.go.id/content/detail/10368/rata-rata-tiga-orang-meninggal-setiap-jam-akibat-kecelakaan-jalan/0/artikel_gpr
- Chen, C.-K., & Wang, Y.-C. (1996). Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System. *IEEE*.
- Deton, T. (2006). *Advanced Automotive Fault Diagnosis 2nd Ed. . Elsevier Butterworth-Heinemann Publ. Oxford*.
- Evans, L., & Gerrish, P. H. (1996). Antilock Brakes and Risk of Front and Rear Impact in Two-Vehicle Crashes. *sciencedirect*, 315-323.
- Fu, T. (2000). *Modeling and Performance Analysis of ABS System with Nonlinear Control*. Monreal, Canada: Concordia University.
- Guo, J., Jian, X., & Lin, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicle with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, 6459-6476.
- Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G., & Sadeghi, M. (2005). Designing a Sliding Mode Controller for Antilock Brake System. *EUROCON* (hal. 258-261). Belgrade, Serbia & Montenegro: IEEE.
- Holkar, K. S., & Waghmare, L. M. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Application*, 1-5.
- Imandiar, Y. P. (2018, November 20). *Tirto*. Diambil kembali dari tirto.id: <https://tirto.id/apakah-abs-efektif-selamatkan->

pengendara-dari-celaka-dagE

- Korovin, S. K., & Utkin, V. I. (1974). Using Sliding Modes in Static Optimization and Nonlinear Programming. *Automatica*, vol 10, 525-532.
- Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a Genetic Neural Antilock-Brake-System Controller. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2.
- Li, W. (2010). *ABS Control on Modern Vehicle Equipped with Regenerative Braking*. Delf University of Technology.
- Ling, Z., & Lang, T. (2012). A Simple Method of ABS Optimal Slip ratio Identification. *Advanced Materials Research Vol. 383-390*, 2453-2457.
- Liu, J., & Wang, X. (2012). *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Motors, M. (2015). *Anti-Lock Brake System*. Diambil kembali dari ROBUSTETE SI SIGURANTA: <https://www.mitsubishi-motors.ro/tehnologie/abs/#!>
- Rahmani, M., Ghanbari, A., & Ettefagh, M. M. (2016). Robust Adaptive Control of a Bioinspired Robot Manipulator Using Bat Algorithm. *Expert Systems with Applications* 56, 164-176.
- Shah, S. (2016). *Design and Implementation of Adaptive Brake Pressure Controller*. Delft: Delft Center for Systems and Control (DCSC).
- Sohl, G., & Bobrow, J. (1999). Experiments and Simulations on The Nonlinear Control of a Hydraulic Servosystem. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 238-247.
- Wabco, M. (1999). *Anti-Lock Braking System Training Program: Student Manual*. Troy, MI USA: Meritor WABCO Vehicle Control System.
- Will, A. B., Hui, S., & Zak, S. H. (1998). Sliding Mode Wheel Slip Controller for an Antilock Braking System. *Vehicle Design*, vol. 19, 523-529.
- Yu, J. (1997). A robust adaptive wheel-slip controller for antilock brake system in Decision and Control. 2545-2546.

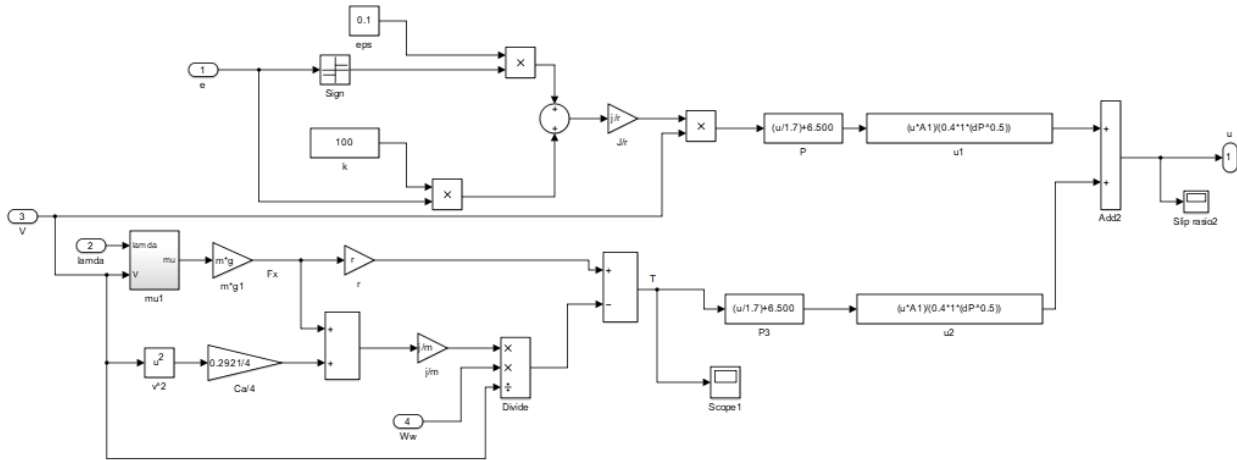
LAMPIRAN

SIMULINK MATLAB R2014a ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM



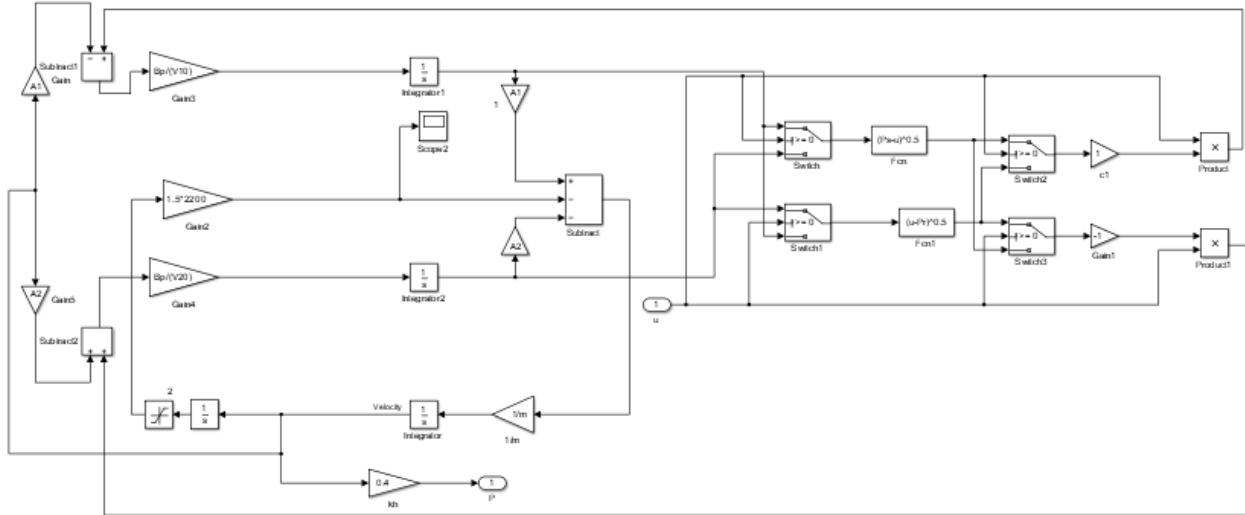
Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a *SLIDING MODE CONTROLLER (SMC)*



Halaman ini sengaja dikosongkan

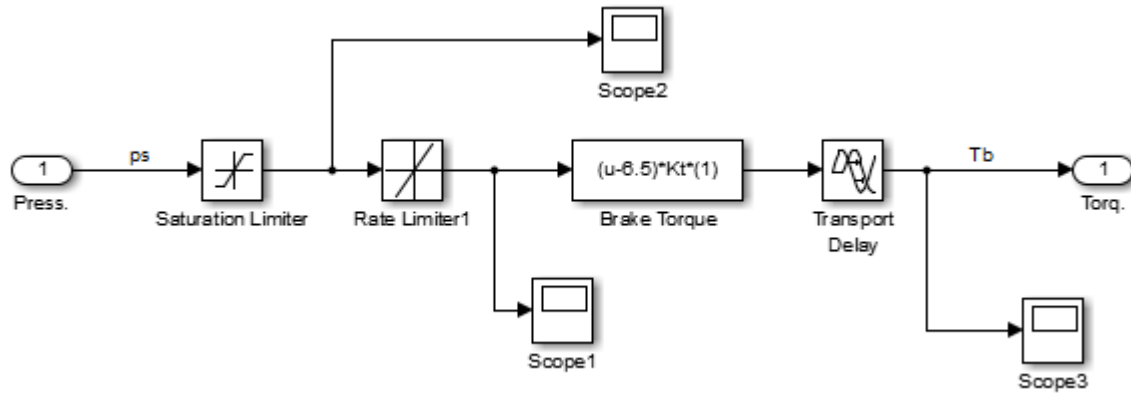
SIMULINK MATLAB R2014a HYDRAULIC SYSTEM



Halaman ini sengaja dikosongkan

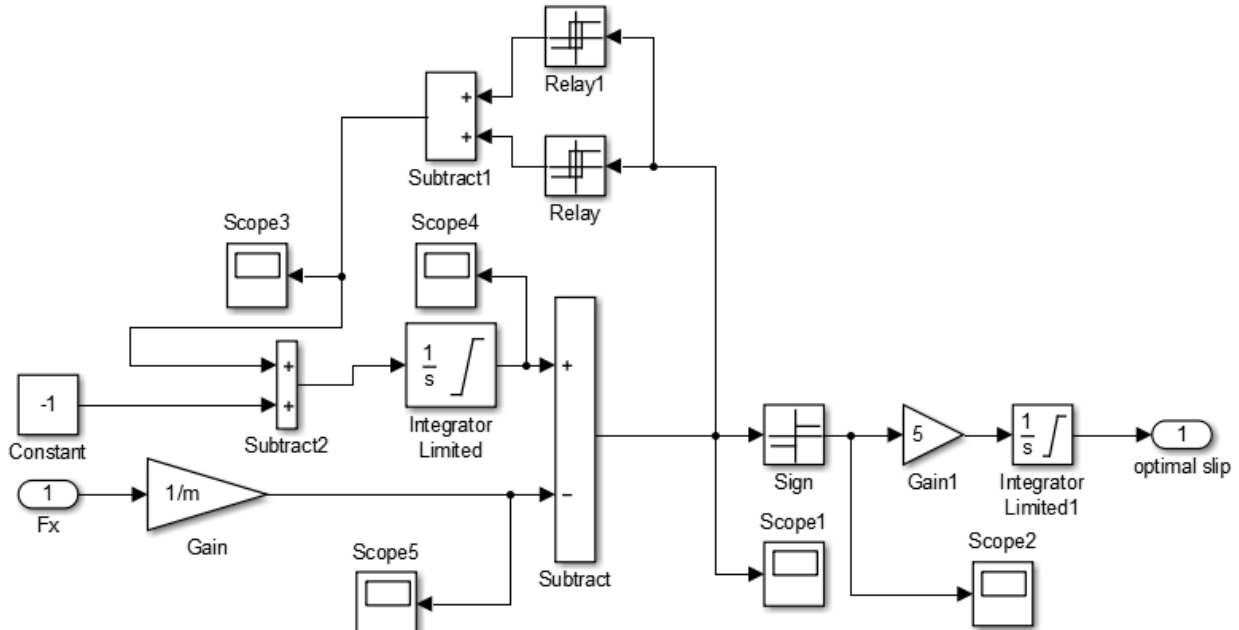
Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a CALIPER SYSTEM



Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a *SUPERVISORY CONTROL*



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama penulis Muhammad Nashrul Fikri dilahirkan di Lamongan, tanggal 17 Mei 1997. Saat ini penulis tinggal di Lamongan. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di MI Al-Khoiriyah Kalimalang pada tahun 2009, pendidikan di MTsN Lamongan pada tahun 2012, pendidikan di MAN Lamongan pada tahun 2015. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS melalui jalur SBMPTN pada tahun 2015. Semasa perkuliahan, penulis aktif organisasi kemahasiswaan di LDJ Jamaah Masjid Manarul Ilmi ITS (JMMI-ITS). Penulis juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika. Pada bulan Juli 2019 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Supervisory Control Pada Anti-Lock Braking System Untuk Quarter vehicle**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email: fikrinashrul@gmail.com*