

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Desain Pengendali *Linear Quadratic Regulator* dan Kalman Filter pada Sistem Suspensi *Quarter Car*

TUGAS AKHIR

Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Kelulusan Tingkat Sarjana Strata 1
Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



UIN SUSKA RIAU

Oleh :

ILHAM PADRI
12250513433

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM
RIAU
PEKANBARU
2026**

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

LEMBAR PERSETUJUAN

TESIS PENGENDALI LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)
DAN KALMAN FILTER PADA SISTEM SUSPENSI
QUARTER CAR

TUGAS AKHIR

Oleh:

ILHAM PADRI
12250513433

ILHAM PADRI
12250513433

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Proposal Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, Pada Tanggal 24 Desember 2025

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, Pada Tanggal 24 Desember 2025

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Hj. L. Sana, S.T., M.Eng
NIP: 1971012 200312 2 004

Pembimbing

Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.
NIP: 19870906 201503 2 006

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PENGESAHAN

TESIS PENGENDALI *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)* DAN KALMAN FILTER PADA SISTEM SUSPENSI *QUARTER CAR*

TUGAS AKHIR

Oleh :

12250513433

ILHAM PADRI

12250513433

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau di Pekanbaru, pada tanggal 24 Desember 2025.

Mengesahkan,

Pekanbaru, 24 Desember 2025

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Guslenita Muda, S.Si., M.Sc
NIP. 19770103 200710 2 001

Dr. Hj. Liliana, ST., M.Eng
NIP. 19781012 200312 2 004

Dewan Penguji

Ketua : Ir. Oktaf Brillian Kharisma, S.T., M.T

Sekretaris : Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.

Anggota I : Ahmad Faizal, S.T., M.T

Anggota II : Hilman Zarory, S.T., M.Eng.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Desain Pengendali Linear Quadratic Regulator dan Kalman Filter pada Sistem Suspensi Quarter Car

ILHAM PADRI
12250513433

Tanggal Sidang : 24 Desember 2025

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas KM 15 No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Sistem suspensi kendaraan berfungsi untuk meredam getaran akibat ketidakrataan permukaan jalan sehingga kenyamanan dan kestabilan kendaraan tetap terjaga. Pada penelitian ini dilakukan perancangan pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Kalman Filter pada model suspensi *quarter car* yang dimodelkan dalam bentuk ruang keadaan dengan empat variabel state. LQR dipilih sebagai metode pengendalian karena mampu menghasilkan aksi kontrol yang optimal melalui minimisasi fungsi biaya kuadratik, sehingga sistem dapat mencapai kompromi terbaik antara performa peredaman dan kebutuhan energi aktuasi. Selain itu, LQR memiliki struktur umpan balik state yang sederhana, stabil untuk rentang parameter yang luas, serta sesuai digunakan pada sistem yang beroperasi di sekitar titik keseimbangan seperti suspensi kendaraan. Untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap ketidakpastian dan noise sensor, Kalman Filter digunakan sebagai estimator state guna memperoleh informasi keadaan yang lebih akurat. Pengujian dilakukan dengan variasi noise sebesar 6–30%, perubahan massa kendaraan, serta gangguan jalan berupa *speed bump*, *speed hump*, dan lubang jalan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa LQR secara efektif meredam simpangan sistem menuju titik setimbang, namun kinerjanya menurun ketika noise pengukuran tinggi. Integrasi dengan Kalman Filter menghasilkan respon yang lebih halus dan stabil karena estimasi state yang lebih bersih memungkinkan LQR bekerja secara optimal. Secara keseluruhan, kombinasi LQR dan Kalman Filter terbukti meningkatkan kualitas peredaman getaran dan kestabilan sistem suspensi *quarter car* dalam berbagai kondisi gangguan.

Kata kunci: Suspensi *quarter car*, LQR, Kalman Filter, pengendalian optimal, *noise*, peredaman getaran

Design of Linear Quadratic Regulator and Kalman Filter Controller for Quarter Car Suspension System

ILHAM PADRI
12250513433

Date of Final Exam: December 23, 2025

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science and Technology

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas KM 15 No. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

The vehicle suspension system plays a crucial role in attenuating road-induced vibrations to maintain ride comfort and stability. This study presents the design of a Linear Quadratic Regulator (LQR) and Kalman Filter for a quarter-car suspension model represented in a state-space form with four states. LQR is selected as the control method because it provides an optimal control action by minimizing a quadratic cost function, enabling an effective trade-off between vibration attenuation and control effort. Moreover, LQR offers a simple state-feedback structure, inherent stability properties, and suitability for systems operating around an equilibrium point, such as automotive suspension systems. To enhance robustness against uncertainties and measurement noise, a Kalman Filter is implemented as a state estimator to obtain more accurate system information. Simulations are performed under varying noise levels (6–30%), different vehicle masses, and various road disturbances, including speed bumps, speed humps, and road potholes. The results indicate that LQR effectively suppresses system deviations toward the equilibrium position, although its performance degrades under high measurement noise. When combined with the Kalman Filter, the system exhibits smoother and more stable responses, as the improved state estimation enables LQR to operate optimally even in noisy environments. Overall, the integration of LQR and Kalman Filter significantly improves the vibration attenuation capability and stability of the quarter-car suspension system under diverse disturbance conditions.

Keywords: *Quarter-car suspension, LQR, Kalman Filter, optimal control, noise, vibration attenuation.*

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan dengan mengikuti kaidah pengutipan yang berlaku.

Penggunaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ILHAM PADRI
NIM : 12250513433
Tempat/Tgl. Lahir : Pekanbaru, 08 Juli 2003
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

DESAIN PENGENDALI *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)* DAN KALMAN FILTER PADA SISTEM SUSPENSI *QUARTER CAR*

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulis Artikel dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada Karya Tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu Artikel saya ini sah, saya nyatakan bebas dari plagiasi.
4. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Artikel saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 24 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,



ILHAM PADRI
NIM. 12250513433

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Sate Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

LEMBAR PERSEMBAHAN



Alhamdulillahirabbil 'alamin. Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan pertolongan-Nya sehingga karya ini dapat diselesaikan. Sembah sujud dan rasa syukur yang tak terhingga kepada Allah SWT atas segala nikmat-Nya." Karya sederhana ini sepenuhnya saya persembahkan untuk dua sosok paling berharga dalam hidup saya:

Ayahanda Tercinta, Weldi Devinel Terima kasih, Ayah, atas setiap tetes keringat yang mengalir demi masa depan saya. Terima kasih telah menjadi sosok yang tangguh, yang mengajarkan saya arti kerja keras dan pantang menyerah. Skripsi ini adalah bukti dari segala pengorbanan dan dukungan luar biasa yang Ayah berikan tanpa pernah mengeluh sedikit pun.

Ibunda Tersayang, Sovia Terima kasih, Ibu, atas doa-doa tulus yang selalu Ibu langitkan di setiap sujudmu. Kasih sayang, kesabaran, dan pelukan hangat Ibu adalah kekuatan terbesar saya saat menghadapi masa-masa sulit dalam penyusunan tugas akhir ini. Gelar ini adalah kado kecil untuk membalas kasih sayangmu yang seluas samudera. Terima kasih karena selalu percaya pada mimpi-mimpi saya, bahkan saat saya sendiri merasa ragu. Keberhasilan ini bukanlah akhir, melainkan langkah awal saya untuk membahagiakan kalian berdua. Semoga Allah SWT selalu menjaga dan menyayangi kalian sebagaimana kalian menyayangi saya sejak kecil.

Gelar ini untuk kalian, Ayah dan Ibu.

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya...”

(QS. Al-Baqarah [2]: 286)

“education is most the powerful weapon which you can use to change the world (Nelson Mandela)

Hidup bukan saling mendahului, Bermimpilah sendiri-sendiri (Hindia-Besok mungkin kita sampai)

ILHAM PADRI

23 DESEMBER 2025

KATA PENGANTAR



Assalamu 'alaikum wr.wb

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia serta hidayahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan waktu. Atas karunia Allah SWT, Tugas Akhir dengan judul “**Desain pengendali *Linear quadratic regulator* dan Kalman filter pada sistem suspensi *Quarter car***” dapat diselesaikan penulis tepat waktu

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, bimbingan dan pengarahan diberikan oleh orang-orang yang memiliki pengetahuan, wawasan, dan pengalaman luar biasa, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menerima banyak bantuan, dorongan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih yang tak terhingga disampaikan kepada :

1. Allah SWT, dengan rahmat-Nya dan hidayah-Nya, telah memberikan segala yang terbaik dan petunjuk sehingga penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kepada kedua orang tua ayahanda dan ibunda. Terimakasih telah selalu mendoakan dan semua pengorbanan, kepercayaan, dan nasehat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
Bapak Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti, MS, M.Si., Ak., CA. selaku Rektor Uin Suska Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya..
Bapak Dr. Yuslenita Muda, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau beserta kepada seluruh Staf dan jajarannya.
Ibu Dr. Liliana, ST.,M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
Bapak Aulia Ullah, ST.,M.Eng. selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau.
Ibu Dr. Dian Mursyitah, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada diri sendiri, atas usaha keras dan keteguhan untuk menyelesaikan apa yang sudah dimulai, serta senantiasa menikmati setiap prosesnya yang bisa terbilang tidak mudah. Kemampuan dalam mengatur waktu, tenaga, dan pikiran memungkinkan penyelesaian Tugas Akhir ini tepat waktu.

Ucapan Terima kasih kepada seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Kanaya Syafa Az-zahra yang telah menjadi bagian dari perjalanan hidup dan berkontribusi banyak dalam penulisan skripsi ini. Baik tenaga, waktu, dan pemikiran kepada penulis

10. Teman-Teman seperjuangan dalam Konsentrasi Instrumentasi 2022, serta teman-teman teknik elektro angkatan 2022 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna karena keterbatasan ilmu pengetahuan, kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan.

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pekanbaru, 18 Oktober 2025

Penulis

Ilham Padri

NIM.12150513433

DAFTAR ISI

Halaman

LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	v
SURAT PERNYATAAN	vi
LEMBAR PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR RUMUS	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-4
1.3 Tujuan Penelitian	I-4
1.4 Batasan Penelitian.....	I-4
1.5 Manfaat Penelitian	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori.....	II-2
2.2.1 Sistem Suspensi.....	II-2
2.2.2 Model Matematis sistem suspensi.....	II-3
2.2.3 Kontrol ability dan Observ ability.....	II-7
2.2.4 Tanggapan Sistem.....	II-8
2.2.5 Linear Qaudratic Regulator(LQR).....	II-9
2.2.6 Kalman filter Sebagai Observer.....	II-11
2.2.7 Gaussian white noise.....	II-12
2.2.8 Software MATLAB	II-13
BAB III METODE PENELITIAN.....	III-1

Gambar

	Halaman
2.1 suspensi mobil	II-3
2.2 Sistem Suspensi mobil.....	II-3
2.3 Desain pengendali LQR	II-11
2.4 Desain Observer Kalman.....	II-12
2.5 Tampilan MATLAB.....	II-13
3.1 Diagram Penelitian	III-2
3.2 Sistem suspensi open loop.....	III-5
3.3 Simulink suspensi yang ditambahkan <i>noise</i>	III-6
3.4 Desain blok simulink sistem suspensi dengan Kalman filter sebagai observer	III-10
3.5 Blok simulink sistem suspensi yang sudah menggunakan LQR	III-11
3.6 Desain sistem suspensi ditambahkan Kalman dan LQR	III-12
4. 1 Grafik sistem suspensi open loop	IV-2
4. 2 Hasil grafik estimasi kalman filter	IV-3
4. 3 Hasil grafik Linear Quadratic regulator.....	IV-4
4. 4 Hasil grafik dengan perbedaan massa mobil	IV-10
4. 5 hasil Grafik dengan gangguan speed bump.....	IV-13
4. 6 Hasil grafik dengan gangguan speed hump.....	IV-15
4. 7 Hasil grafik dengan gangguan lubang jalan	IV-17

DAFTAR RUMUS

2.1	Hukum Newton II	II-4
2.2	Persamaan gaya pada massa M1	II-4
2.3	Persamaan diferensial sistem suspensi	II-4
2.4	Persamaan state-space untuk M1	II-4
2.5	Bentuk matriks state-space M1	II-4
2.6	Persamaan gaya pada massa M2	II-4
2.7	Persamaan <i>diferensial</i> sistem M2	II-5
2.8	Bentuk <i>state-space</i> M2	II-5
2.9	Bentuk matriks <i>state-space</i> M2	II-5
2.10	Persamaan umum <i>sistem state-space</i>	II-5
2.11	Definisi variabel state	II-5
2.12	Persamaan orde sistem	II-5
2.13	Substitusi ke persamaan orde	II-6
2.14	Penjabaran akhir sistem	II-6
2.15	Bentuk akhir persamaan <i>state-space</i>	II-6
2.16	Persamaan <i>state space</i>	II-8
2.17	Matriks Kontrolabilitas	II-8
2.18	Persamaan <i>state space</i>	II-8
2.19	Matriks Observabilitas	II-8
2.20	Persamaan <i>state space</i>	II-10
2.21	Persamaan indeks performansi	II-10
2.22	Persamaan mencari nilai K	II-10
2.23	Persamaan akhir nilai u	II-10
2.24	Persamaan Riccati pada	II-10
2.25	Gain K	II-11
2.26	Persamaan sistem yang ditambah <i>noise</i>	II-11
2.27	Persamaan kalman filter	II-11
2.28	Persamaan nilai gain kf	II-11
2.29	Persamaan riccati equation kalman	II-12
2.30	Persamaan <i>noise</i>	II-13
2.31	Penyederhanaan persamaan noise	II-13

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.32	Persamaan <i>gaussian white noise</i>	II-13
3.1	Persamaan matriks A sistem suspensi.....	III-3
3.2	Persamaan matriks B	III-4
3.3	Persamaan matriks C	III-4
3.4	Persamaan matriks D	III-4
3.5	Pendefinisian Matriks observer Kalman	III-8
3.6	Persamaan estimator Kalman	III-8
3.7	Persamaan estimasi Kalman	III-8
3.8	Matriks transformasi keadaan.....	III-9
3.9	Matriks pengukuran sistem.....	III-9
3.10	Persamaan sistem baru dengan observer	III-9
3.11	Persamaan perhitungan gain Kalman (Q dan R)	III-9
3.12	Nilai akhir gain Kalman-Bucy.....	III-9
3.13	Nilai Q kalman	III-9
3.14	Nilai R kalman.....	III-9

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2. 1 Parameter sistem suspensi mobil.....	II-7
2. 2 Parameter gangguan jalan.....	II-7
3.1 Blok <i>Simulink</i>	III-4
3.2 Algoritma sistem suspensi <i>open loop</i>	III-5
3.3 Algoritma pemograman kalman filter.....	III-10
3.4 Algoritma pemograman LQR	III-12
3.5 Algoritma pemograman sistem suspensi ditambahkan LQR dan Kalman filter	III-14
4. 1 Nilai Performansi LQR.....	IV-5
4. 2 Pengujian dengan perubahan noise.....	IV-7
4. 3 Perubahan Massa Mobil	IV-9
4. 4 Pengujian LQR dengan Variasi Massa mobil	IV-11
4. 5 Performansi LQR dengan Gangguan speed bump	IV-14
4. 6 Performansi Gangguan Hump	IV-16
4. 7 Performansi Gangguan Lubang.....	IV-18

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR SINGKATAN

BPF	: <i>Band Pass Filter</i>
DC	: <i>Direct Current</i>
HPF	: <i>High Pass Filter</i>
IC	: <i>Initial Condition</i>
KF	: <i>Kalman Filter</i>
LQR	: <i>Linear Quadratic Regulator</i>
LPF	: <i>Low Pass Filter</i>
MATLAB	: <i>Matrix Laboratory</i>
MIMO	: <i>Multiple Input Multiple Output</i>
PID	: <i>Proportional Integral Derivative</i>
Ts	: <i>Settling Time</i>
Td	: <i>Delay Time</i>
Tp	: <i>Peak Time</i>
Tr	: <i>Rise Time</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tingkat kenyamanan berkendara sangat erat hubungannya dengan sistem suspensi mobil [1]. Sistem suspensi berfungsi juga untuk mengurangi getaran pada kabin kendaraan yang disebabkan oleh ketidak rataan jalan. Sistem suspensi dirancang untuk menahan getaran akibat benturan roda dengan kondisi jalan [2]. Secara khusus, sistem suspensi memaksimalkan gesekan antara ban dengan jalan untuk memberikan stabilitas kemudi dan handling yang baik. Sistem suspensi juga berfungsi untuk meminimalisir dampak dari kondisi jalan tertentu tidak hanya kendaraan, tetapi juga penumpang yang berada di dalam kendaraan [3]. Sistem suspensi mobil dikategorikan menjadi 2 jenis yaitu suspensi pasif dan suspensi aktif. Sistem suspensi pasif pada kendaraan terdiri atas elemen pegas dan redaman yang berfungsi menjaga kestabilan gerak vertikal kendaraan. Namun, karena tidak mampu menyuplai energi ke dalam sistem, kinerjanya menjadi kurang responsif terhadap perubahan profil jalan. Berbeda dengan itu, sistem suspensi aktif dilengkapi aktuator gaya yang dapat memberikan energi tambahan, sehingga mampu mempertahankan kenyamanan dan keamanan berkendara secara lebih efektif ketika terjadi variasi kondisi permukaan jalan [4].

Berbagai penelitian terkait pengendalian suspensi mobil telah banyak dilakukan. Dimulai dari pengendali konvensional seperti PID [5] yang merupakan kendali konvensional. Meskipun pengendali konvensional seperti PID sangat efektif untuk sistem linier, kelemahan utamanya adalah kesulitan beradaptasi, terutama saat dihadapkan pada dinamika sistem yang cepat berubah [6]. Ini sangat berbanding terbalik dengan sistem suspensi yang memiliki dinamika sistem yang berubah-ubah, baik dari kondisi jalan ataupun dari gangguan perubahan beban.

Sedangkan untuk kendali cerdas seperti *fuzzy* [7], Terdapat kekurangan yakni *fuzzy* harus memperbarui aturan sistem kontrol logika *fuzzy* secara teratur dan tentunya algoritma yang digunakan memerlukan banyak pengujian untuk validasi dan verifikasi. Selain itu, algoritma sistem kontrol pada logika *fuzzy* sepenuhnya bergantung pada pengetahuan dan keahlian manusia [8]. Ini menjadi salah satu kelemahan mendasar yang terletak pada proses perancangannya yang sangat bergantung pada pengetahuan untuk mendefinisikan respons suspensi yang ideal.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Selanjutnya kendali *robust* seperti SMC(*Sliding Mode Control*)[6]. Pengendali SMC memiliki kekurangan salah satunya adalah *chattering* yaitu osilasi frekuensi tinggi osilasi ini disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*, sehingga dapat mempengaruhi kestabilan sistem[9]. Kendali ini tidak disarankan untuk sistem yang membutuhkan proses yang stabil. Pada sistem suspensi, misalnya, kestabilan adalah fondasi utama untuk mencapai kenyamanan, keamanan, serta keselamatan dalam berkendara.

Untuk kebutuhan suspensi, dengan masalah utama kestabilan dan pengaruh gangguan memuat penulis mengeksplorasi mengenai kendali optimal itu, metode kendali optimal merupakan solusi yang efektif untuk sistem suspensi ini. Istilah optimal mempunyai maksud hasil paling baik yang dapat dicapai dengan memperhatikan kondisi dan kendala dari suatu sistem. Dalam sistem kendali optimal, istilah optimal seringkali merujuk pada minimal, misalnya meminimalkan bahan bakar (*input*), waktu dan kesalahan (*error*)[10]. *Linear Quadratic Regulator* (LQR) adalah salah satu metode kendali optimal. Metode ini menghasilkan *feedback gain* yang dapat meminimalkan fungsi biaya kuadratik dengan memperhitungkan *error* sistem[11]). Pemilihan LQR karena pengendali ini mempunyai kemampuan yang baik dalam mengoptimalkan kinerja sistem, keoptimalannya dalam mempercepat respon waktu untuk mencapai setpoint, kestabilan dan *disturbance rejection*[12]

Linear Quadratic Regulator (LQR) pada dasarnya berfungsi sebagai pengendali tipe regulator, yaitu pengendali yang dirancang untuk menjaga sistem tetap berada di sekitar titik kesesimbangannya, bukan untuk mengikuti perubahan referensi tertentu. Dalam perumusannya, LQR mengasumsikan bahwa kondisi yang ingin dicapai adalah state nominal yang umumnya bernilai nol dan sinyal kontrol dihitung untuk meminimalkan penyimpangan sistem dari titik tersebut melalui optimasi fungsi biaya kuadratik. Oleh karena itu, ketika digunakan pada sistem suspensi, LQR akan secara otomatis mengarahkan defleksi suspensi kembali ke kondisi stabil (nol), sehingga kurang tepat jika digunakan untuk melakukan *tracking* terhadap setpoint yang berubah. Konsep ini sudah menjadi pendekatan standar dalam desain pengendalian modern pada sistem suspensi, karena fokus utama bukanlah mengatur tinggi statis kendaraan, melainkan menekan pengaruh gangguan dinamis dari permukaan jalan. Dalam konteks sistem suspensi aktif, LQR berfungsi sebagai otak cerdas yang menentukan seberapa besar gaya yang harus dikeluarkan oleh aktuator suspensi secara *real-time* untuk meredam guncangan dari jalan.

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Namun, Studi perbandingan gangguan pada sistem suspensi aktif *quarter-car* yang dikendalikan oleh LQR memiliki kelemahan. Kontroler LQR terbukti kurang efektif dalam menekan vibrasi yang disebabkan oleh gangguan tunggal ber-amplitudo besar, seperti sinyal gundukan, dibandingkan dengan jenis gangguan lainnya[13]. Selain itu, kinerja optimal sistem kendali ini dihadapkan pada tantangan praktis lain dari sisi sensor. Implementasinya di lapangan menunjukkan bahwa tidak semua variabel keadaan (*state variables*) dapat diukur secara langsung, padahal akurasi data sangat menentukan performa sistem.

Dalam aplikasi nyata seperti sistem suspensi mobil, pengukuran seluruh variabel keadaan secara langsung tidak praktis karena keterbatasan biaya dan adanya *noise* yang melekat pada sensor dan penggunaan sensor kerap kali membutuhkan biaya yang signifikan. Selain itu, informasi yang diterima dari sensor seringkali terganggu oleh derau (*noise*). Untuk mengatasi keterbatasan ini, dirancang sebuah *estimator* matematis yang dikenal sebagai *state observer*. *Observer* bertugas merekonstruksi variabel keadaan (*state*) yang tidak dapat diukur secara langsung dengan cara meniru dinamika internal sistem (*plant*)[14] seperti yang dikemukakan oleh Luenberger, *observer* telah terbukti efektif tidak hanya untuk monitoring dan regulasi, tetapi juga untuk mendeteksi kesalahan pada identifikasi dinamika sistem[15]

Beberapa metode *observer* yang umum digunakan meliputi *Luenberger Observer*, *Kalman Filter*, *Extended Kalman Filter*, dan *High-Gain Observer*[16]. Untuk dapat mengatasi masalah *noise* pada sistem suspensi, diperlukan sebuah *state estimator* yang andal. Salah satunya Kalman filter. Kalman filter memiliki banyak penerapan atau aplikasi, salah satunya adalah untuk memfilter *noise*. Kalman filter berbeda dengan filter pada umumnya seperti *high pass filter*(HPF), *low pas filter*(LPF) ataupun *band pass filter*(BPF) yang hanya memfilter pada frekuensi tertentu. Semua frekuensi akan di filter oleh kalman filter sehingga kalman filter lebih baik dari pada LPF, HPF dan BPF dalam menghilangkan *noise*[17]. Oleh karena itu, Kalman Filter dipilih sebagai solusi dalam penelitian ini. Kemampuannya telah terbukti optimal dalam mengestimasi keadaan sistem linier, bahkan di tengah adanya gangguan (*noise*) kontinu, yang dalam konteks ini merepresentasikan guncangan dari permukaan jalan

Penelitian terkait yang menggunakan PID sebagai pengendali dan Kalman sebagai *observer* pada motor DC bahwa Kalman filter dapat mengurangi *noise* terhadap pembacaan sensor[6]. Pada penelitian lainnya Sistem juga diberi *noise* berupa *gaussian white noise* yang kemudian dapat direduksi oleh filter Kalman[18]. Berdasarkan studi pustaka, Kalman-Filter

mampu mengestimasi keadaan sistem dengan adanya *noise*. Berkaitan dengan sistem suspensi yang rentan terhadap gangguan, Kalman filter menjadi metode yang dipilih karena kemampuannya menyaring *noise* atau pada sistem suspensi disebut guncangan karena permukaan jalan yang tidak rata[16]. sehingga dengan adanya LQR dan Kalman-filter sebagai *observer* merupakan pilihan yang tepat untuk sistem suspensi ini. Berdasarkan permasalahan tadi maka penelitian ini akan berfokus pada”**Desain pengendali *Linear Quadratic Gaussian*(LQR) dan kalman filter pada sistem suspensi quarter car**’

1.2 Rumusan Masalah

Adapun Rumusan Masalah pada penelitian ini adalah Bagaimana merancang kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *observer* Kalman filter untuk sistem suspensi aktif model *quarter car* dalam meredam guncangan akibat berbagai variasi profil jalan jalan (*speed bump*, *speed hump*, dan jalan berlubang).

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah Merancang dan memodelkan sistem kendali suspensi aktif dengan kendali LQR dan *observer* Kalman-filter dalam meredam guncangan akibat berbagai variasi profil jalan (*speed bump*, *speed hump*, dan jalan berlubang).

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian yaitu:

1. Pemodelan sistem suspensi mobil berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Alpin Adriansyah[16]
2. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah suspensi atau pegas yang mempengaruhi posisi mobil.
3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *simulink* MATLAB R2023a

1.5 Manfaat Penelitian

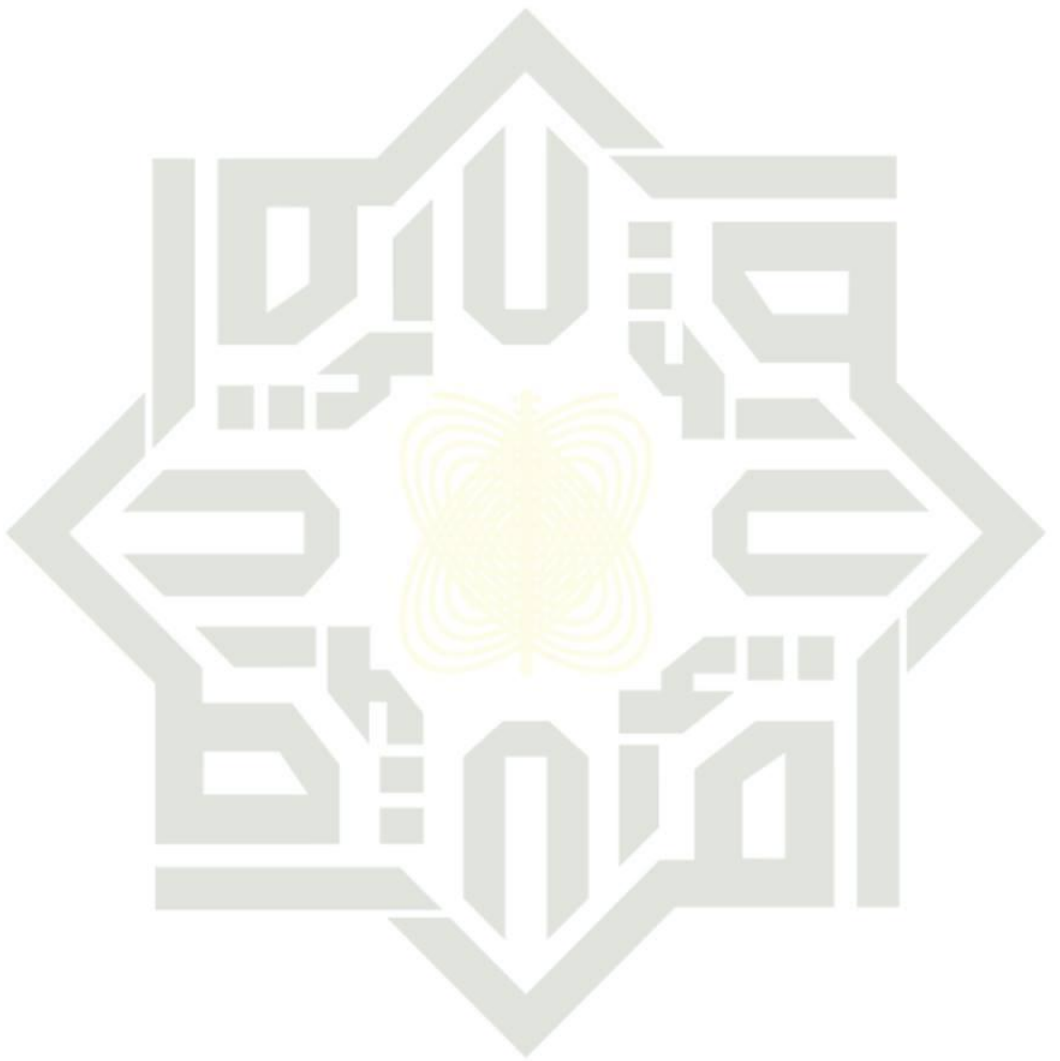
Manfaat Pada penelitian ini adalah:

1. Dapat dijadikan referensi pendukung untuk pengembangan bagi penelitian-penelitian berikutnya
2. Dapat memberi pengetahuan tentang Pengendalian pada sistem suspensi mobil menggunakan LQR sebagai Pengendali

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Dapat memberi pengetahuan tentang estimasi pada sistem suspensi mobil menggunakan kalman filter sebagai *state observer*
4. Diharapkan pengendalian suspensi mobil ini nanti nya dapat diterapkan pada sistem yang sesungguhnya



UIN SUSKA RIAU

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian tugas akhir ini diawali dengan studi literatur yang mencakup teori dan referensi terkait permasalahan yang diteliti. Adapun penelitian terkait dengan pengendalian suspensi mobil telah banyak dilaksanakan. Sebuah penelitian yang menjadi acuan penting dalam konteks ini adalah "Implementasi Kontrol PID pada Kopel Motor DC dengan Menggunakan Filter Kalman". Dalam penelitian tersebut, penulis berhasil mengatasi masalah *noise* pengukuran pada sistem motor DC. Kalman Filter diimplementasikan untuk memberikan estimasi keadaan (posisi dan kecepatan sudut) yang akurat dan bebas *noise* kepada kontroler PID. Hasilnya menunjukkan bahwa integrasi Kalman Filter mampu meningkatkan unjuk kerja kontroler PID secara signifikan, menghasilkan respons yang lebih mulus dan stabil.[6]

Penelitian selanjutnya menggunakan pengendali PID dan *Fuzzy Logic*, pengendali PID dilakukan dengan metode PID tuning secara berulang-ulang sampai mendapatkan hasil yang optimal. Pemberian $k_p = 9558.3589$, $k_i = 57244.9325$, $k_d = 22.9008$ dan mendapatkan hasil *settling time* = 1.7 detik, *peak time* = 1.02, *rise time* = 1.02 detik, dan kendali PID mengalami *overshoot* sebesar 2,09%. Sedangkan kendali *Fuzzy Logic* dengan 49 aturan *Fuzzy* mendapatkan *settling time* = 1.05 detik, *peak time* = 0.51 detik, *rise time* = 0.4 detik dan *overshoot* = 2.78%. jadi disimpulkan kendali PID mampu meningkat kinerja dari pada kendali *Fuzzy Logic*, sedangkan Kendali PID juga mampu menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil dari paad *Fuzzy Logic*. Masih terdapat *overshoot* pada kedua kendali[19]

Selanjutnya penelitian terkait Kalman-Bucy telah dilakukan Berdasarkan analisis hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa *observer* Kalman-Bucy yang dirancang berhasil menunjukkan performa estimasi yang sangat baik. Robustisitas *observer* divalidasi melalui serangkaian pengujian yang mencakup gangguan jalan sesuai standar PM 14 Tahun 2021 (*lubang*, *speed bump*, *speed hump*) dan penambahan *noise* Gaussian hingga 50% pada sistem dan pengukuran. Di sisi lain, sensitivitasnya terbukti andal dalam melacak keadaan sistem meskipun terdapat variasi pada kondisi awal dan perubahan massa kendaraan dalam rentang 400 kg hingga 600 kg.[16]

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Penelitian yang menggunakan PID dan LQR Berdasarkan hasil pengujian dan simulasi respon sistem yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa pengendali LQR-PID mampu meredam overshoot dan osilasi pada sistem suspensi seperempat kendaraan. Hal ini dibuktikan berdasarkan hasil visual dan identifikasi sistem secara keseluruhan diperoleh nilai rise time 0.35 detik, settling time 0.39 detik serta overshoot 0 % serta error steady state [20]

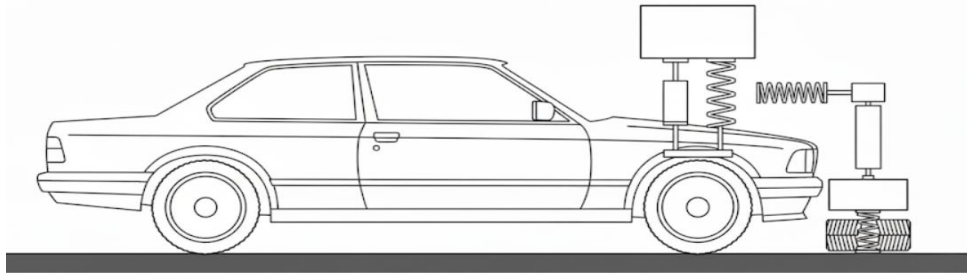
Dengan gangguan gundukan (road bump), sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang dirancang dapat menghasilkan tingkat kenyamanan dan keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif, yaitu ditunjukkan dengan menghasilkan nilai maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan nilai rata defleksi suspensi yang lebih rendah. Hasil dari seluruh penelitian menunjukkan bahwa Kendali LQR dan Kalman Filter sebagai Observer sangat cocok digunakan untuk sistem suspensi. dari beberapa penelitian terbukti bahwa kalman mampu menghilangkan *noise* dan LQR mampu memberikan hasil keluaran yang optimal [21]

Dari beberapa hasil penelitian tadi dapat disimpulkan bahwa LQR dan Kalman sebagai *observer* adalah kombinasi yang baik, karena kalman mampu menghilangkan *noise* yang muncul akibat pembacaan dan ketidakakuratan sensor

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Suspensi

Salah satu sistem yang ditanamkan pada setiap kendaraan roda empat adalah sistem suspensi pada masing-masing roda untuk menahan gangguan-gangguan vertikal yang sering terjadi pada saat kendaraan melaju di jalan raya seperti lonjakan, lubang, dan sebagainya. Sistem suspensi tersebut dirancang sedemikian rupa demi kenyamanan dan keamanan penumpang pada saat berkendara [22] Jika getaran dari jalan tidak diredam secara efektif, bodi kendaraan akan mengalami osilasi atau ayunan berlebih. Getaran yang tidak terkontrol ini dapat menyebabkan berbagai masalah, mulai dari ketidaknyamanan penumpang dan suara bising, hingga hilangnya traksi ban dan percepatan keausan komponen.[23]. Contoh suspensi mobil dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



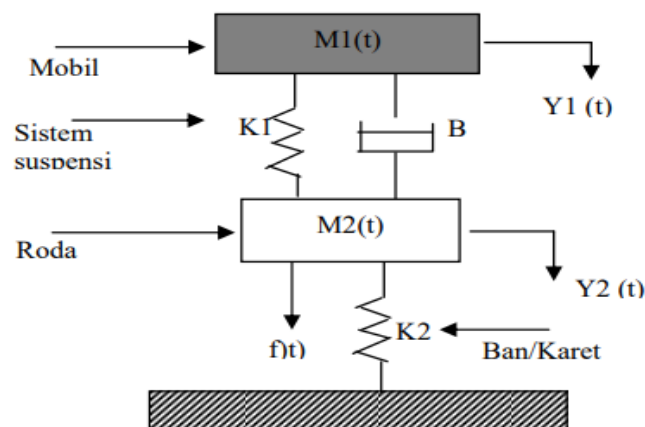
Gambar 2.1 suspensi mobil

Secara umum sistem suspensi kendaraan terdiri atas sebuah pegas dan sebuah peredam kejut yang disusun secara paralel. Fungsi utama sistem suspensi adalah

- Menyangga berat kendaraan
- Memberikan kenyamanan pengendara terhadap kondisi jalan yang dilalui
- Menjaga traksi roda terhadap permukaan jalan
- Menjaga kesejajaran roda[24]

2.2.2 Model Matematis sistem suspensi

Pemodelan matematis memainkan peran krusial dalam pengembangan sistem kendali otomatis. Pemodelan ini memungkinkan representasi hubungan matematis antara *input* dan *output* sistem, sehingga mendukung analisis yang lebih baik, perancangan kendali yang optimal, serta prediksi respon sistem terhadap perubahan tertentu [25]. Model matematika dapat diasumsikan dalam berbagai bentuk. Tergantung sistem tertentu dan keadaan tertentu, satu model matematika mungkin lebih cocok daripada lainnya. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar yang merupakan sistem suspensi berikut ini



Gambar 2. 2 Sistem Suspensi mobil

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Model matematis dari *plant* dapat diperoleh dengan menurunkan hubungan antara masing-masing komponen yang menyusunnya. Untuk penyederhanaan *plant*, akan dilihat sistem suspensi pada salah satu roda mobil:

Gambar 2.2. Berdasarkan tersebut, dua persamaan muncul dari sistem ini karena terdapat dua pergeseran (*displacement*) yang saling bebas. Sistem suspensi diturunkan dengan menggunakan persamaan Hukum Newton II yaitu :

$$\sum f = m.a \quad (2.1)$$

Dengan :

f = gaya

m = massa

a = percepatan

Dimana pada sistem ini yang merupakan *input* adalah u yaitu gaya dan output adalah y yaitu posisi. Sehingga pada massa M_1 didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$M_1 a_1 = -B(V_1(t) - V_2(t)) - K_1(y_1(t) - y_2(t)) \quad (2.2)$$

Pada M_1 terdapat 2 parameter yang mempengaruhi yaitu B (Dumper) dan K (Suspensi) Dimana B mempengaruhi kecepatan dan K mempengaruhi posisi. Sehingga dari persamaan didapatkan sebuah persamaan *differensial* dari turunan rumus diatas. Sehingga menjadi:

$$M_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = -B \left(\frac{dy_1(t)}{dt} - \frac{dy_2(t)}{dt} \right) - K_1(y_1(t) - y_2(t)) \quad (2.3)$$

Setelah didapatkan persamaan *differensial* maka selanjutnya merubah kedalam bentuk *state space equation*. Sehingga akan menjadi sebagai berikut:

$$M_1 \ddot{y}_1(t) = -B(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)) - K_1(y_1(t) - y_2(t)) \quad (2.4)$$

Maka

$$\ddot{y}_1(t) = -\frac{B}{M_1}(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)) - \frac{K_1}{M_1}(y_1(t) - y_2(t)) \quad (2.5)$$

Selanjutnya, Pada M_2 , terdapat gaya yang mengenainya. Sehingga terdapat 4 parameter pada M_2 yaitu B (dumper), K_2 (Karet ban), K_1 (Suspensi) dan gaya(F). Sehingga untuk persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_2 a_2 = f(t) - B(V_2(t) - V(t)) - K_1(y_2(t) - y_1(t)) - K_2 y_2(t) \quad (2.6)$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Setelah didapatkan persamaan awal selanjutnya ubah menjadi sebuah persamaan *differensial* seperti berikut ini:

$$M_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} = f(t) - B \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) - K_1 (y_2(t) - y_1(t)) - K_2 y_2(t) \quad (2.7)$$

Sehingga untuk *state space equation* dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_2 \ddot{y}_2(t) = f(t) - B(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - K_1(y_2(t) - y_1(t)) - K_2 y_2(t) \quad (2.8)$$

Maka

$$\ddot{y}_2(t) = \frac{u(t)}{M_2} - \frac{B}{M_2}(\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)) - \frac{K_1}{M_2}(y_2(t) - y_1(t)) - \frac{K_2}{M_2} y_2(t) \quad (2.9)$$

Setelah didapatkan persamaan *state space equation* dari M_1 dan M_2 langkah selanjutnya adalah membuat matriks dari kedua persamaan tersebut. Dimana untuk persamaan umumnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Langkah awal dalam membuat matriks adalah definisikan setiap persamaan, dimana

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y_1(t) \\ x_2(t) &= \dot{y}_1(t) \\ x_3(t) &= y_2(t) \\ x_4(t) &= \dot{y}_2(t) \\ f(t) &= u(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Berdasarkan persamaan 4.3 dan 4.5 , Kemudian definisikan menjadi persamaan orde,

Dimana:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \dot{y}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \ddot{y}_1(t) = -\frac{B}{M_1}(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)) - \frac{K_1}{M_1}(y_1(t) - y_2(t)) \\ \dot{x}_3(t) &= \dot{y}_2(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) &= \ddot{y}_2(t) = \frac{u(t)}{M_2} - \frac{B}{M_2}(\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)) - \frac{K_1}{M_2}(y_2(t) - y_1(t)) - \frac{K_2}{M_2}(y_2(t)) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Kemudian substitusikan setiap persamaan tersebut

$$\begin{aligned}\ddot{x}_2(t) = \ddot{y}_1(t) &= -\frac{B}{M_1}(x_2(t) - x_4(t)) - \frac{K_1}{M_1}(x_1(t) - x_3(t)) \\ \ddot{x}_4(t) = \ddot{y}_2(t) &= \frac{u(t)}{M_2} - \frac{B}{M_2}(x_4(t) - x_2(t)) - \frac{K_1}{M_2}(x_3(t) - x_1(t)) - \frac{K_2}{M_2}(x_3(t))\end{aligned}\quad (2.13)$$

Langkah selanjutnya adalah jabarkan dari persamaan, Sehingga menjadi:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{K_1}{M_1}x_1(t) - \frac{B}{M_1}x_2(t) + \frac{K_1}{M}x_3(t) + \frac{B}{M_1}x_4(t) \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{-K_1}{M_2}x_1(t) + \frac{B}{M_2}x_2(t) + \frac{(K_1 + K_2)}{M_2}x_3(t) + \frac{B}{M_2}x_4(t) + u(t)\end{aligned}\quad (2.14)$$

Setelah penjabaran selesai langkah selanjutnya adalah membuat persamaan *state space equation*, *state space equation* dipilih karena kebutuhan dalam perancangan kendali optimal Lqr, Sehingga didapatkan persamaan seperti berikut ini

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M_1} & -\frac{B}{M_1} & \frac{K_1}{M_1} & \frac{B}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_1}{M_2} & \frac{B}{M_2} & -\left(\frac{K_1 + K_2}{M_2}\right) & -\frac{B}{M_2} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]\end{aligned}\quad (2.15)$$

Data parameter yang digunakan merujuk pada penelitian yang telah dilakukan Alpin adriansyah, dimana mobil yang akan dikendalikan adalah Toyota kijang GRAND, dengan massa mobil kosong 1600kg, kapasitas penumpang dan begasi 800kg, sehingga mobil maksimum ± 2400 kg (massa mobil + penumpang penuh + begasi penuh). Sedangkan 2000

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

kg (massa mobil + $\frac{1}{2}$ penumpang dan Bekasi). Pada penelitian ini hanya menggunakan seperempat mobil maka parameter seperti berikut:

Tabel 2. 1 Parameter sistem suspensi mobil

Parameter	Nilai parameter	Satuan
M_1 (massa mobil)	400	Kg
B (<i>shock absorber</i>)	2500	N/m
K_1 (Pegas)	10000	N/m
M_2 (Massa roda)	15	Kg
K_2 (Elastisitas karet ban)	13000	N/m

Selain parameter sistem suspensi diatas adapun parameter gangguan jalan yang akan diuji ke simulasi sistem suspensi yaitu berdasarkan peraturan menteri perhubungan republik indonesia nomor PM 14 tahun 2021 tentang perubahan atas peraturan menteri perhubungan nomor PM 48 tahun 2018 tentang alat pengandali dan pengaman pengguna jalan [26].

Tabel 2. 2 Parameter gangguan jalan

Jenis Pembatas Kecepatan	Ketinggian
<i>Speed bump</i>	5-9 cm
<i>Speed hump</i>	8-15 cm
Lubang	-10 cm

2.2.3 Kontrol ability dan Observ ability

Kontrolabilitas (*Controllability*) dalam sistem kendali adalah kemampuan suatu sistem untuk dikendalikan dari kondisi awal tertentu menuju kondisi akhir yang diinginkan dalam waktu tertentu melalui sinyal masukan (*input control*). Dengan kata lain, sistem dikatakan kontrolabel apabila setiap keadaan (*state*) di dalam sistem dapat dicapai dengan memberikan masukan yang sesuai.

Secara matematis, untuk sistem linear dalam bentuk ruang keadaan (*state-space*):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (2.16)$$

dengan A adalah matriks sistem dan B adalah matriks input, maka kontrolabilitas dapat diuji menggunakan matriks kontrolabilitas berikut:

$$C = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Sistem dikatakan kontrolabel jika matriks C memiliki rank penuh (*full rank*), yaitu $\text{rank}(C) = n$, di mana n adalah jumlah variabel keadaan sistem.

Observabilitas (*Observability*) dalam sistem kendali adalah kemampuan untuk menentukan atau memperkirakan keadaan internal (state) suatu sistem hanya dengan mengamati keluaran (output) dan masukan (*input*) dalam selang waktu tertentu. Dengan kata lain, sistem dikatakan observable apabila setiap keadaan internalnya dapat diketahui berdasarkan informasi dari sinyal keluaran.

Untuk sistem linear dalam bentuk *state-space*:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (2.18)$$

di mana A adalah matriks sistem, B matriks input, C matriks output, dan D matriks umpan langsung, maka observabilitas dapat diuji menggunakan matriks observabilitas berikut:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sistem dikatakan observable jika matriks O memiliki rank penuh, yaitu $\text{rank}(O) = n$, dengan n adalah jumlah variabel keadaan.

2.2.4 Tanggapan Sistem

Tanggapan sistem kendali terhadap sinyal masukan terdiri dari dua bagian, yaitu tanggapan transien dan tanggapan tunak. Tanggapan transien adalah tanggapan sistem yang

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

berlangsung dari keadaan awal hingga mencapai keadaan akhir. Sementara itu, tanggapan tunak menggambarkan perilaku keluaran sistem ketika waktu (t) mendekati tak hingga. Untuk menganalisis dan mendesain suatu sistem kendali, perlu dilakukan perbandingan kinerja dengan menetapkan sinyal-sinyal uji tertentu dan membandingkan tanggapan sistem terhadap sinyal masukan tersebut. Jenis sinyal uji yang sering digunakan dalam sistem kendali meliputi fungsi tangga, fungsi laju, dan fungsi sinusoidal. Di antara jenis sinyal tersebut, fungsi tangga adalah yang paling sering digunakan karena mampu memberikan informasi tentang karakteristik tanggapan transien dan tanggapan tunak suatu sistem. Dalam menentukan karakteristik tanggapan transien suatu sistem kendali terhadap masukan tangga satuan, dicari parameter-parameter (performansi sistem) sebagai berikut:

1. Waktu Penetapan (*Settling Time*), t_s : Waktu yang diperlukan oleh kurva tanggapan untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir, yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%).
2. Waktu Tunda (*Delay Time*), t_d : Waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir pada saat lonjakan yang pertama kali.
3. Waktu Naik (*Rise Time*), Waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari nilai akhir. Untuk sistem orde dua dengan redaman kurang (*underdamped*), digunakan waktu naik 0-100%. Untuk sistem dengan redaman lebih (*overdamped*), digunakan waktu naik 10-90%.
4. Waktu Puncak (*Peak Time*), t_p : Waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai puncak lewat (lonjakan maksimal) yang pertama kali.
5. Lewatan Maksimum (*Maximum Overshoot*), M_p :
Nilai puncak maksimum dari kurva tanggapan yang diukur dari satu. Jika nilai keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan satu, maka dapat digunakan persentase lewatan maksimum [27]

2.2.5 Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear quadratic regulator (LQR) adalah suatu metode kendali modern karena menerapkan sistem multiple input multiple output (MIMO), di mana sistem yang akan dikendalikan dibuat menjadi bentuk state space sehingga pengendalian dapat dilakukan dari beberapa masukan dan menghasilkan beberapa keluaran [18]. Kontroler LQR memiliki dua parameter, yakni matriks pembobot Q dan R , yang harus ditentukan agar dapat menghasilkan aksi kontrol optimal sesuai harapan. LQR mengendalikan sebuah proses (atau *plant*) dengan

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

memanfaatkan kombinasi linier dari keadaan (*state*) sistem tersebut. Untuk merancang sebuah kontroler LQR, langkah pertama yang wajib dilakukan adalah memilih nilai untuk matriks pembobot Q dan R . [28] Untuk persamaan LQR dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (2.20)$$

Dimana persamaan diatas adalah Plant dari sistem suspensi, dengan indeks performansi pada persamaan berikut

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.21)$$

Berdasarkan sistem yang ditentukan nilai matriks K ditentukan dari persamaan vektor kendali optimal Sehingga persamaan indeks performansi (J) diminimalkan. Nilai matriks P didapatkan dengan cara menyelesaikan persamaan Aljabar Riccati tereduksi, seperti

$$u(t) = -(R^{-1} B^T P) x(t) = -Kx(t) \quad (2.22)$$

Sehingga didapatkan

$$u = -K \hat{x}(t) \quad (2.23)$$

Untuk mendapatkan nilai K , Maka diperlukan persamaan *Riccati equation* Seperti persamaan berikut ini

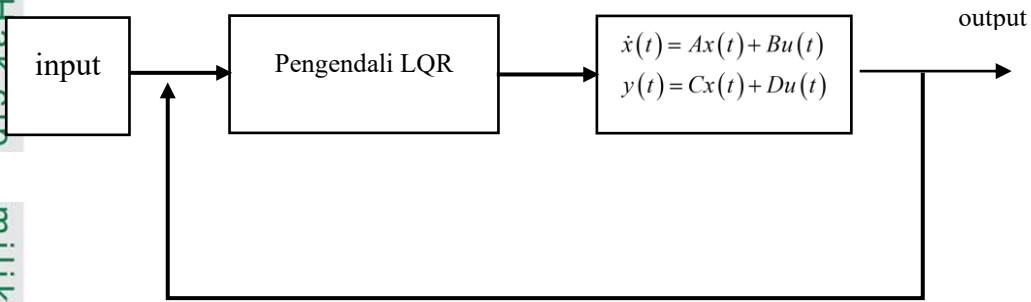
$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (2.24)$$

Setelah Matriks P didapatkan maka gunakan persamaan berikut ini untuk mendapatkan matriks Gain optimal K

$$K = R^{-1} B^T P \quad (2.25)$$

Berikut adalah desain sistem yang ditambahkan pengendali LQR

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 3 Desain pengendali LQR

2.2.6 Kalman filter Sebagai *Observer*

Kalman filter merupakan metode estimasi yang bersifat asimilasi. Asimilasi merupakan cara memperbaiki estimasi dengan menggabungkan antara model state space dengan data pengamatan (observasi). Keuntungan dari pemanfaatan Kalman filter ini adalah memperbaiki nilai estimasi ketika data pengamatan minim berdasarkan deret waktu.[29]

Sebagai adaptasi waktu kontinu dari Kalman filter (yang merupakan metode waktu diskrit), Kalman filter digunakan untuk menyelesaikan masalah estimasi keadaan. Secara spesifik, metode ini mencari perkiraan paling akurat untuk sistem linier yang dipengaruhi oleh gangguan. Pengaruhnya sangat besar dalam pengembangan teori kontrol, analisis deret waktu, dan pemrosesan sinyal[16]. Berikut adalah persamaan umum Kalman Bucy

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + v(t)\end{aligned}\quad (2.26)$$

Untuk merancang kalman-bucy sebagai *observer*, dituliskan algoritma sebagai berikut

$$\hat{\dot{x}}(t) = A(t) + Bu(t) + k_f(t)(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.27)$$

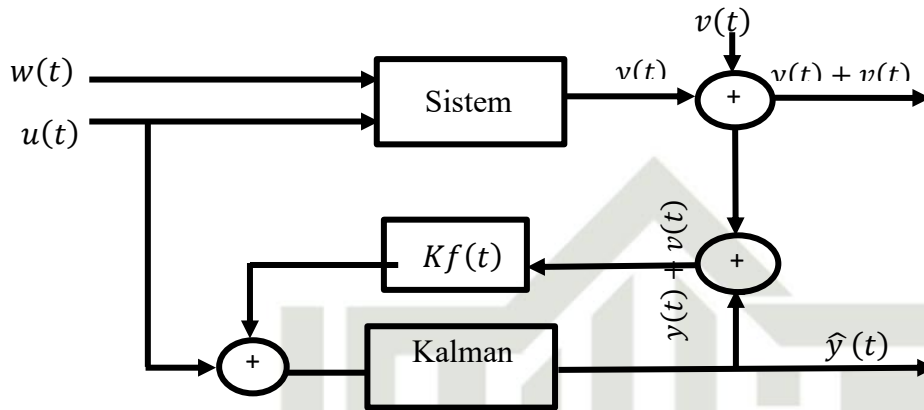
Untuk mendapatkan nilai *gain* $k_f(t)$, dapat diselesaikan dengan persamaan berikut:

$$k_f(t) = P(t)C^T R^{-1}(t) \quad (2.28)$$

Dimana $P(t)$ dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan *riccati equation*

$$\dot{P}(t) = A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C^T R^{-1}(t)CP(t) + Q(t) \quad (2.29)$$

Berikut adalah blok diagram dari Kalman-Bucy sebagai *state observer* berdasarkan persamaan 2.21



Gambar 2. 4 Desain *Observer* Kalman

Gambar 2.4 tersebut memperlihatkan rancangan sistem suspensi kendaraan yang direpresentasikan sebagai sistem dinamis dengan adanya tambahan gangguan berupa *noise*, baik pada proses w (*process noise*) maupun pada hasil pengukuran v (*measurement noise*). Pada penelitian ini, model sistem suspensi disusun dalam bentuk *state-space* untuk menunjukkan keterkaitan antara gaya suspensi, perpindahan massa, kecepatan, serta pengaruh gaya luar akibat ketidakrataan permukaan jalan. Karena pada kenyataannya sistem fisik tidak pernah bebas dari ketidakpastian seperti gangguan eksternal dan kesalahan pada sensor, maka digunakan Kalman Filter sebagai *observer* atau penaksir keadaan guna memperkirakan variabel-variabel sistem yang tidak dapat diukur secara langsung.

2.2.7 Gaussian white noise

Noise merupakan sebuah gangguan yang terjadi terhadap suatu sistem, baik yang disebabkan dari dalam sistem maupun dari luar sistem. *Noise* tersebut dapat berupa sebuah error (kesalahan) atau sinyal random[30]. Salah satu jenis gangguan sinyal yang umum adalah *Gaussian White Noise*, yang dibangkitkan dari bilangan acak dengan distribusi normal (berbentuk lonceng). Karakteristik utamanya adalah nilai rata-ratanya nol (*zero mean*). Perlu dicatat, nilai acaknya terpusat di sekitar nol dan tidak terbatas antara 0 dan 1, melainkan bisa positif atau negatif. Seringkali, variansinya diatur ke nilai 1 untuk standarisasi.[16]. Berikut adalah persamaan untuk mencari nilai *noise*

$$d = rand * \sigma + \mu \quad (2.30)$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Jika μ adalah nol maka rumus diatas dapat disederhanakan menjadi

$$d = rand * \sigma \quad (2.31)$$

Berikut rumus untuk *gaussian white noise* dengan rata-rata 0 dan varian 1

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.32)$$

Keterangan :

$p(x)$ = variabel acak (*random variable*)

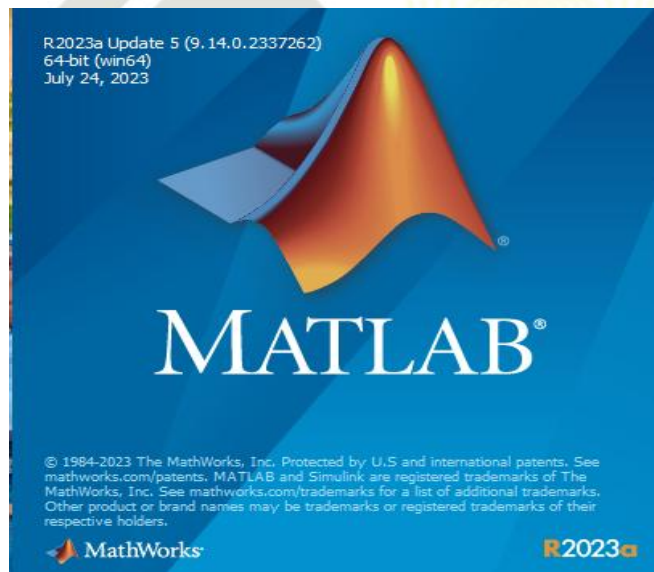
μ = Rata-rata(*mean*)

σ = *Standard deviation*

σ^2 = varians dari distribusi

π = konstanra untuk normalisasi sama dengan nol

2.2.8 Software MATLAB



Gambar 2. 5 Tampilan MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik yang merupakan bahasa pemrograman matematika lanjutan dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Dalam sejarah awal dan perkembangannya, MATLAB berupa suatu *interface* untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek *LINPACK* dan *EISPACK*, dan dikembangkan menggunakan bahasa *FORTRAN*. Secara komersial, MATLAB merupakan produk perusahaan *Mathworks Inc.* yang dalam

perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan *assembler* (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB) [31].

MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus. Penggunaan MATLAB meliputi bidang-bidang:

- 1) Matematika dan Komputasi Algoritma Data θ
- 2) Pemodelan, Simulasi dan Pembuatan *Prototype*
- 3) Analisis Data, Explorasi, dan Visualisasi Grafik [32].

Pada perancangan sistem ini, MATLAB berfungsi untuk melakukan sebuah simulasi berdasarkan pemodelan matematis yang telah didapat, sehingga penulis dapat melihat bagaimana respon sistem yang akan muncul dalam bentuk sebuah grafik

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3.1 Proses Alur Penelitian

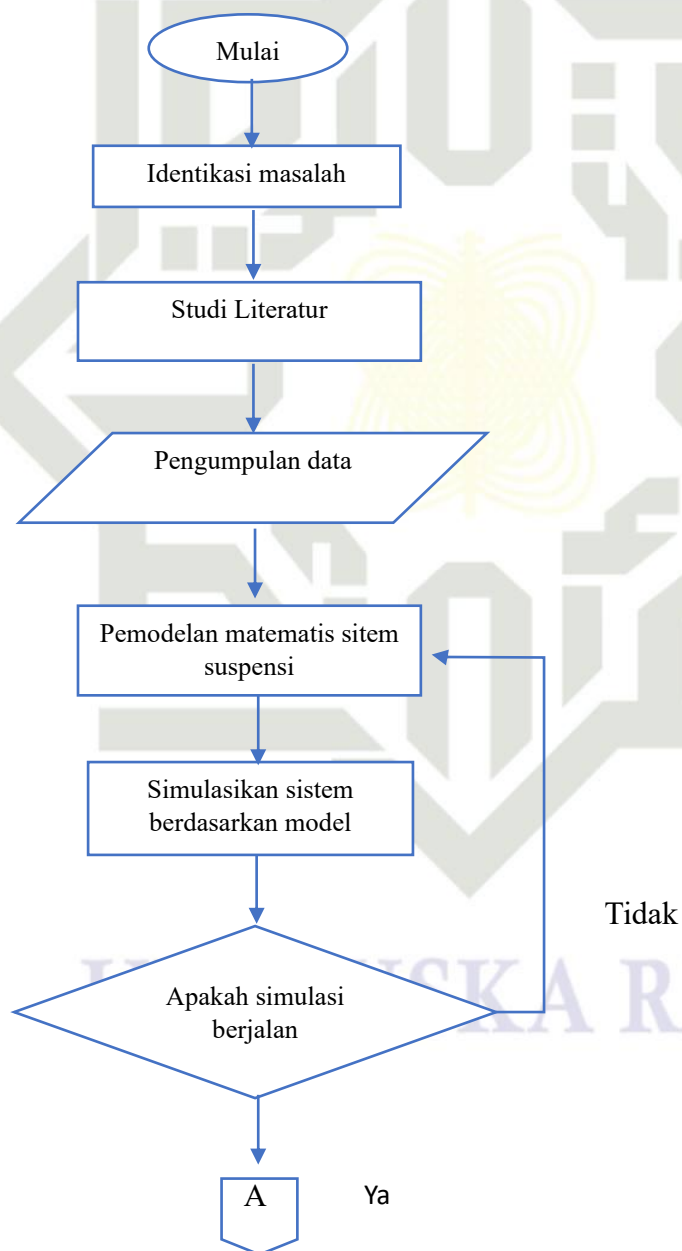
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB III METODE PENELITIAN

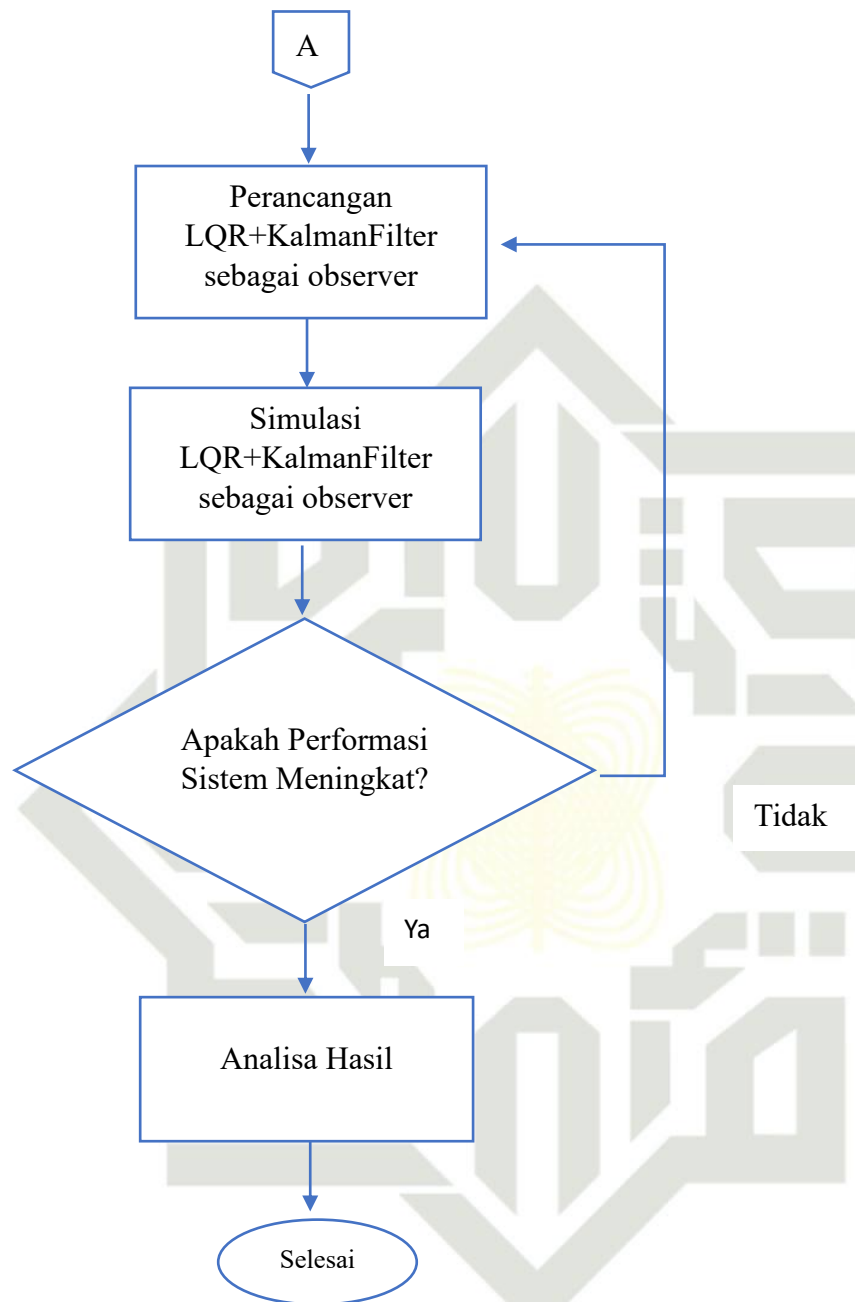
Proses Alur Penelitian

Beberapa tahapan utama penelitian tugas akhir ini yaitu penentuan judul, perumusan masalah, penetapan tujuan penelitian, pemodelan matematis dari sistem yang dikaji, serta proses perancangan. Alur penelitian tersebut dapat digambarkan melalui *flowchart* berikut :



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 1 Diagram Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Berdasarkan *Flow Chart* diatas berikut adalah tahapan poenelitian

1. Identifikasi masalah

Melakukan identifikasi masalah pada sistem suspensi adalah langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Dimana pada sistem suspensi sering terdapat gangguan

berupa getaran akibat jalanan yang tidak datar. Banyak pengendalian modern sudah diterapkan bahkan menggabungkan dua pengendali sekaligus, namun hasilnya masih terdapat *error* dan *overshoot*. Selain itu, pengendalian yang digunakan masih tergantung dari hasil pengukuran sensor. Yang mana sensor memiliki akurasi yang terbatas. Oleh karena itu, dalam penelitian tugas akhir ini diajukan pendekatan baru yaitu Kalman filter sebagai *state observer* untuk estimasi pada sistem suspensi dan mendukung atau bahkan menggantikan kinerja sensor[16].

2. Studi Literatur

Penulis memulai dengan melakukan studi literatur untuk mempelajari dan memahami berbagai penelitian terkait sistem suspensi, seperti buku, makalah, jurnal, dan referensi lainnya yang berkaitan dengan sistem suspensi, Kalman filter serta *observer* dan juga memahami konsep kendali terutama LQR

3. Pengumpulan data

Setelah melakukan studi literatur, data-data yang telah didapatkan terkait sistem suspensi tersebut akan di kumpulkann untuk dijadikan sebuah konsep dasar

4. Pemodelan matematis sistem suspensi

Sistem suspensi yang menjadi topik pada penelitian kali ini akan dijadikan sebuah model matematis terlebih dahulu, yang nantinya berguna dalam membuat sebuah program. Berikut adalah hasil matriks yang didapatkan pada persamaan 2.15

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -6.25 & -3.1250 & 6.25 & 3.1250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 166.6667 & 83.33 & -383.3333 & -83.33 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$C = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (3.3)$$

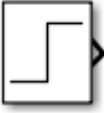
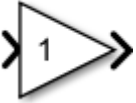
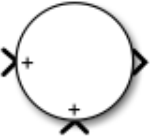
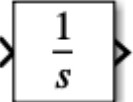
$$D = 0$$

(3.4)

Perancangan Blok Simulink Berdasarkan Persamaan matematis

Setelah model matematis didapatkan, Maka selanjutnya adalah membuat blok simulink yang terdapat di MATLAB. Ini bertujuan untuk memastikan dan memudahkan untuk melakukan simulasi. Berikut adalah Beberapa blok simulink yang digunakan

Tabel 3. 1 Blok *Simulink*

SIMULINK	FUNGSI
	Fungsi <i>Simulink Step</i> adalah blok bawaan yang digunakan untuk memberikan masukan berupa sinyal <i>step</i> atau loncatan tangga pada suatu sistem. Sinyal <i>step</i> sering digunakan dalam analisis sistem kendali untuk mengamati respons transien dan respons tunak suatu sistem terhadap perubahan mendadak.
	Blok <i>Simulink Gain</i> digunakan untuk mengalikan sinyal masukan dengan konstanta tertentu. Fungsi ini sering digunakan untuk menskalakan sinyal dalam suatu simulasi, baik dalam analisis sistem kendali, pemodelan matematika, maupun sistem dinamik lainnya.
	Blok <i>Simulink Sum</i> adalah blok yang digunakan untuk melakukan operasi aritmatika, Seperti penjumlahan, pengurangan, atau kombinasi keduanya pada sinyal masukan. Blok ini berguna untuk menggabungkan beberapa sinyal kedalam satu keluaran operasi aritmatika yang di inginkan berdasarkan
	Blok <i>Simulink Integrator</i> digunakan untuk melakukan integrasi terhadap sinyal masukan $u(t)$ seiring waktu dalam simulasi. Blok ini sering digunakan untuk memodelkan dinamika sistem yang melibatkan variabel keadaan (<i>state</i>), seperti Posisi dari kecepatan atau suhu dari laju perubahan
	Blok <i>Simulink Scope</i> adalah blok yang digunakan untuk memvisualisasikan sinyal keluaran dari model Simulink selama

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

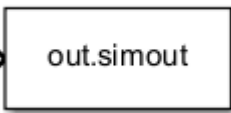
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

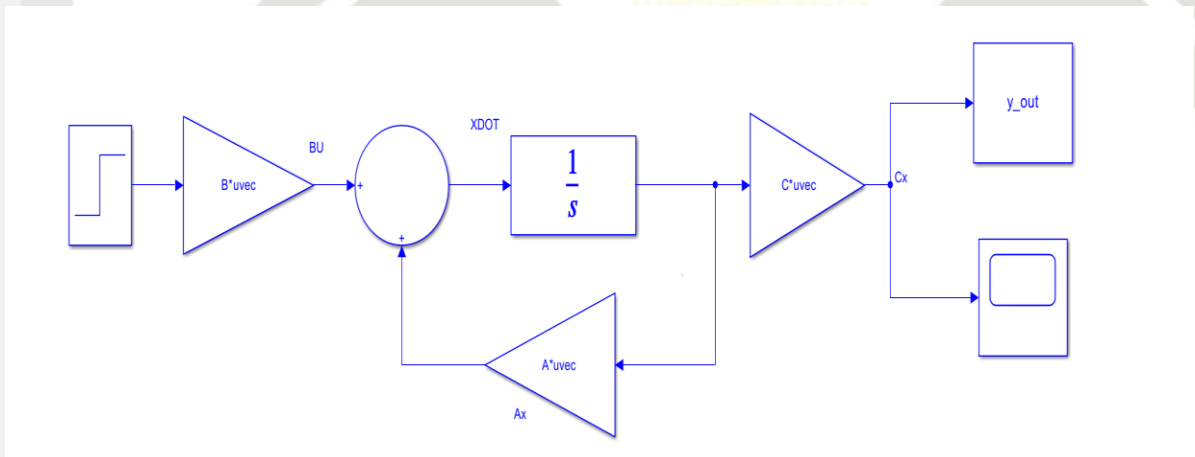
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta r N Suska Riau

	a simulasi. Blok ini berfungsi seperti osiloskop, yang memungkinkan Anda melihat grafik sinyal masukan terhadap waktu secara langsung.
	Blok <i>Simulink To Workspace</i> digunakan untuk menyimpan data sinyal dari simulasi ke dalam <i>workspace</i> MATLAB. Dengan menggunakan blok ini, data keluaran dapat dianalisis lebih lanjut, diproses, atau divisualisasikan menggunakan fungsi MATLAB.

6. Simulasikan sistem berdasarkan model matematis

Setelah didapatkan model matematis maka pada tahapan ini akan diimplementasikan ke software MATLAB yang nantinya akan dilakukan simulasi. Beberapa blok yang dipakai yaitu blok *step* sebagai *input*, blok *gain*, blok *integrator* blok *to workspace* serta blok *scope* untuk menampilkan *output* dalam bentuk grafik. Berdasarkan persamaan 2.10



Gambar 3. 2 Sistem suspensi *open loop*

Setelah membangun blok *Simulink* untuk sistem Suspensi dalam konfigurasi *open loop*, langkah berikutnya adalah merumuskan algoritma pemrograman untuk Suspensi dalam mode *open loop* sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Algoritma sistem suspensi *open loop*

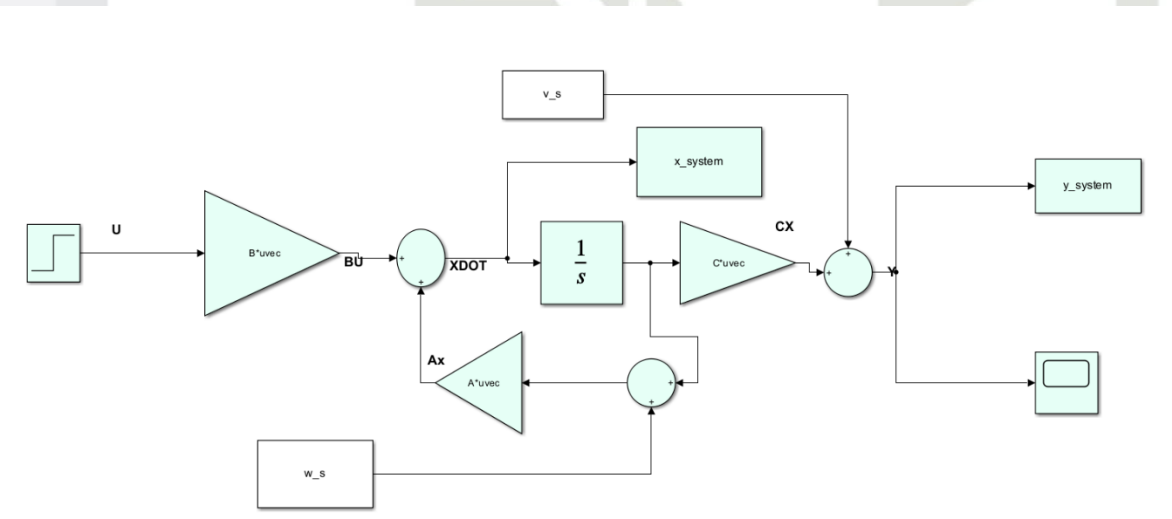
ALGORITMA 1. Pemrograman sistem suspensi <i>open loop</i>	
1	Mulai
2	Inisialisasi sistem ; <i>clear all; close all; clc</i>

3	Definisikan waktu; T_start , $T_Sampling$, T_end , $T = T_start$, $T_Sampling$, T_end $T_start=0$; $T_Sampling=0.02$; $T_end=25$;
4	Definisikan parameter (Tabel 2.1)
5	Definisikan matrik (Rumus 2.15)
6	Panggil blok <i>simulink</i> : <code>sim("suspensi_1_fixx.slx")</code>
7	Plot grafik; <code>plot(T,y_out,'b','LineWidth',2);grid</code>
8	Selesai

Tabel 3.2 adalah algoritma pemrograman dari sistem suspensi *open loop* yang belum ditambahkan *noise*. Selanjutnya, desain untuk sistem yang ditambahkan *noise*

7. Sistem suspensi yang ditambahkan *noise*

Setelah Sistem *open loop* langkah berikutnya adalah membuat *noise*. Tahap perancangan *noise* merupakan langkah krusial dalam penelitian ini untuk memastikan simulasi yang dilakukan dapat merepresentasikan kondisi sistem di dunia nyata. Sistem fisik pada kenyataannya selalu dipengaruhi oleh dua sumber ketidakpastian utama *Noise state* (w) yang merepresentasikan gangguan dan dinamika tak termodelkan pada sistem suspensi, serta *noise* pengukuran (v) yang berasal dari ketidak sempurnaan sensor berdasarkan persamaan 2.26 dibentuk blok *simulink* seperti gambar berikut ini



Gambar 3. 3 Simulink suspensi yang ditambahkan *noise*

Tabel 3. 3 Algoritma pemograman *Noise*

Algoritma pemrograman 2. Pemrograman *noise*

- 1 Memberi pemograman dengan nama program membangun *_noise.m*
- 2 Membuat perintah *clc; clear all; close all;*(membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
- 3 Membuat “data_sistem_suspensi” yang telah disimpan pada pemograman 1 keruang kerja matlab.
- 4 Mendefenisikan *sigma_w* (*noise* untuk *state*) dengan $\max(y_sistem) * 0.06$ atau (6%).
- 5 Mendefenisikan *sigma_v* (*noise* untuk pengukuran) dengan $\max(x_sistem) * 0.06$ atau (6%).
- 6 Membangun signal random acak yaitu *rw* dan *rv*
- 7 Gangguan acak *rw* dan *rv* tersebut dinormalisasi sehingga terdistribusi dengan rata-rata 0 dan varian 1.
- 8 Hasil normalisasi dijumlahkan dengan masing-masing *noise sigma_w* dan *sigma_v*
- 9 Data *noise* di *save* dengan nama ‘*datanoise*’

8. Desain Kalman Filter

Dalam mendesain Kalman filter, langkah pertama dilakukan yaitu mendefinisikan model *state space* dari sistem suspensi seperti 2.11. Sehingga Matrik A, B, C, dan D dari sistem suspensi dapat dilihat Pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4). Langkah selanjutnya yang dapat dilakukan adalah mendefinisikan model *state space* kontinu seperti persamaan (2.26) Dimana pada persamaan (2.26) terdapat *noise w(t)* pada *state* dan terdapat *noise v(t)* pada pengukuran. *noise* tersebut dirancang sebagai sinyal *gaussian white noise*. Dimana Q adalah varian untuk *noise w(t)* dan R adalah varian untuk *noise v(t)*. Berdasarkan blok diagram Kalman-Bucy pada gambar 2.3 bahwa diperlukan sebuah sistem untuk merancang Kalman-Bucy sebagai *observer*. Yang mana sebuah sistem tersebut sudah dirancang berdasarkan *state space*, dapat dilihat pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4). Pada blok diagram Kalman pada gambar (2.4) terdapat *Kf* yang merupakan *gain kalman*- atau istilah lain dikenal dengan sebagai matrik *gain* Kalman. *Kf* adalah matrik Kalman-

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Bucy yang digunakan untuk memperbarui estimasi keadaan sistem berdasarkan pengukuran. K_f diselesaikan dengan persamaan (2.28)

Berikut langkah-langkah untuk mendapatkan *gain* k_f dengan mendefinisikan algoritma berikut dalam matlab. Defenisikan matrik *observer* dengan nama seperti berikut

$$\begin{aligned} A_{obs} &= [A] \\ B_{obs} &= [B] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$C_{obs} = [C]$$

$$D_{obs} = [D]$$

Setelah mendefinisikan matrik kalman-bucy sebagai *observer*, maka Adapun persamaan umum kalman *state* estimator dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Gw \quad (3.6)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) + Hw + v \quad (3.7)$$

Dimana $[Bu(t) + Gw]$ diasumsikan sebagai matrik (BG) , dan matrik (DH) merupakan diasumsikan $[Du(t) + Hw]$. Sehingga matrik (BG) dan (DH) dapat dituliskan sebagai berikut

$$BG = \begin{bmatrix} B_{obs} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$DH = [D_{obs} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}] \quad (3.9)$$

Sehingga dapat dituliskan sistem baru sebagai berikut ini:

$$sys_kf = ss(A_{obs}, BG, C_{obs}, DH) \quad (3.10)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Kemudian untuk *gain* K_f dapat dicari dimana Q dan R sudah diketahui sebelumnya yaitu Q adalah *noise* pada sistem (w) dan R adalah *noise* pada pengukura (v) sehingga dihitung menggunakan matlab dengan persamaan berikut ini

$$[kalmf, K_f, p] = kalman(sys_kf, Q, R) \quad (3.11)$$

Berikut adalah nilai K_f yang di dapat

$$K_f = \begin{bmatrix} 1.7159 \\ 0.5920 \\ 0.1440 \\ -1.2054 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dan nilai Q adalah sebagai berikut

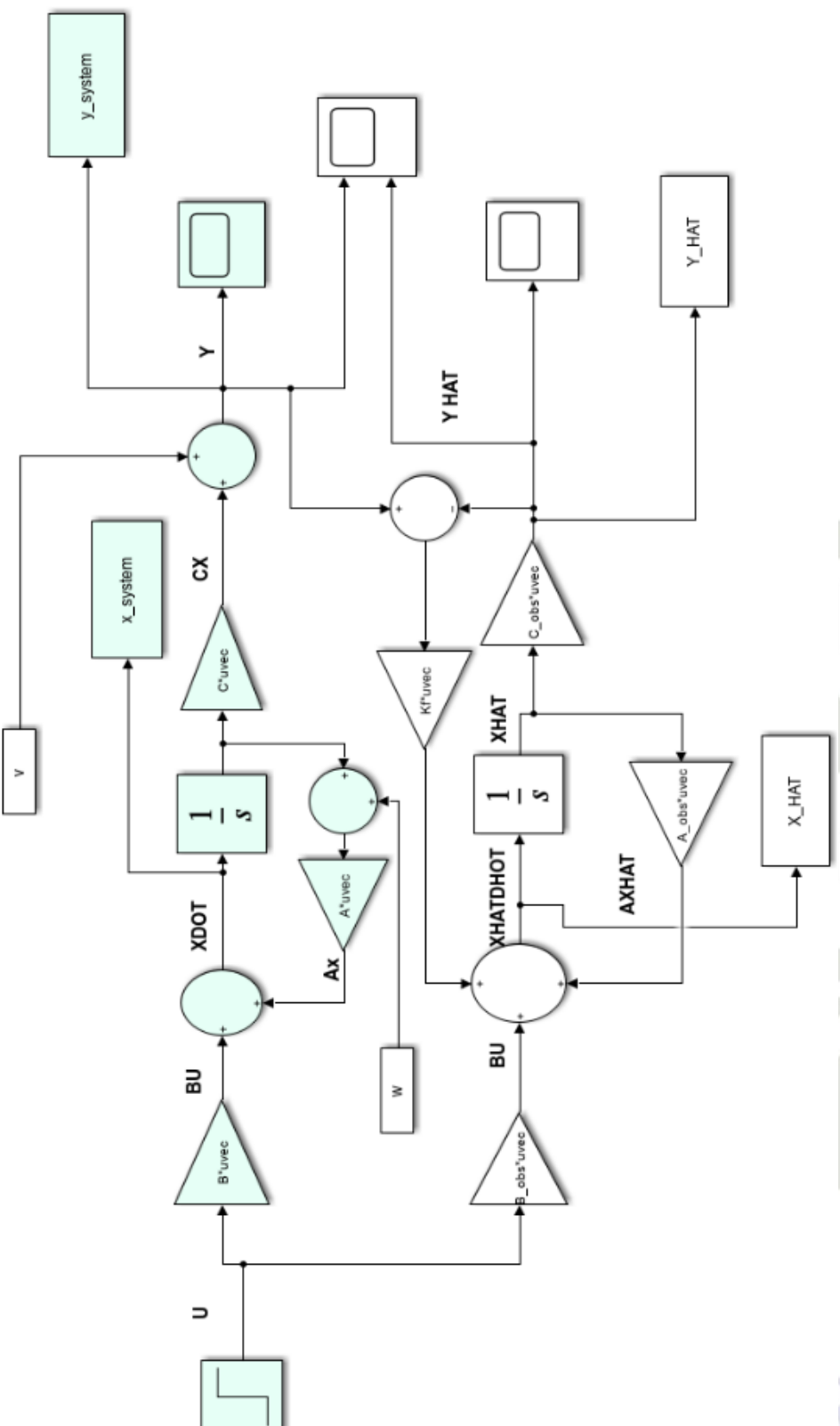
$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0025 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dan untuk R adalah sebagai berikut

$$R = [0.000036] \quad (3.14)$$

Setelah didapatkan *gain* K_f , selanjutnya dapat dirancang Kalman-bucy sebagai *state observer* berdasarkan persamaan (2.27) menggunakan blok-blok *simulink* pada Tabel 3.1. Berikut adalah tampilan dari rangkain blok diagram sistem suspensi dengan *noise* (w) dan (v) dan kalman-bucy sebagai *observer* yang telah dirancang menggunakan *Simulink* matlab adalah sebagai berikut:

UIN SUSKA RIAU



- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

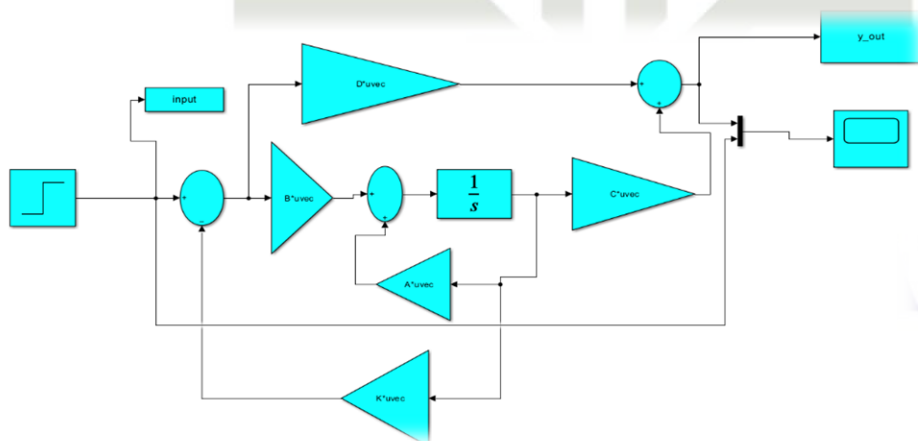
Algoritma 3 pemrograman kalman

1. Memberi nama program simulasi sistem suspensi dengan Suspensi_kalman
2. Membuat perintah `clc`; *clear* all; *close* all; (membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
3. Memuat data_sistem_suspensi keruang kerja matlab
4. Memuat data *noise* keruang kerja matlab
5. Membangun nilai Q dan R
6. Mendefinisikan kondisi awal sistem yang diberi *noise* dimulai dari [0.1; 0; 0; 0].
7. Mendefinisikan matriks Kalman-Bucy sebagai *state observer* (Rumus 3.5)
8. Mendefinisikan gain Kalman (*kf*)
9. Mendefinisikan kondisi awal *observer* yang dimulai dari [0.1; 0; 0; 0].
10. Memanggil program *simulink* matlab dengan nama “SUSPENSIOBSERVERfix”
11. Plot untuk melihat respon keluaran Kalman-Bucy sebagai *observer*

End

9. Desain LQR

Desain Pengendali menggunakan LQR didasarkan pada persamaan 2.23 dengan matriks yang telah diuji dalam konfigurasi *open loop*, adalah Blok simulink untuk perancangan LQR



Gambar 3. 5 Blok *simulink* sistem suspensi yang sudah menggunakan LQR

Berikut adalah Algoritma untuk membuat sistem menggunakan LQR

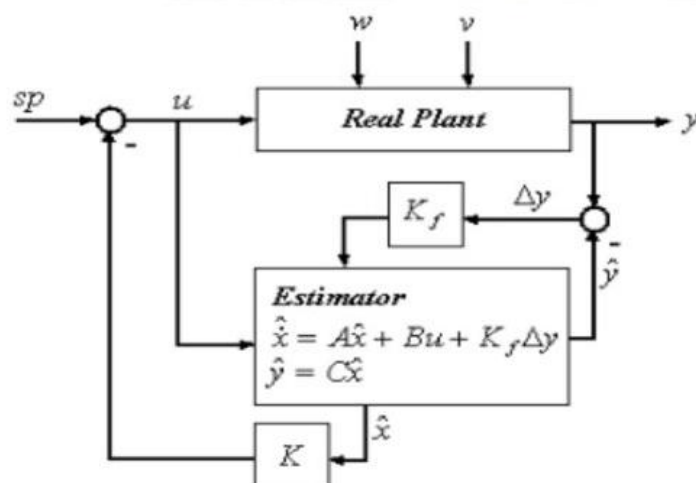
Tabel 3. 4 Algoritma pemrograman LQR

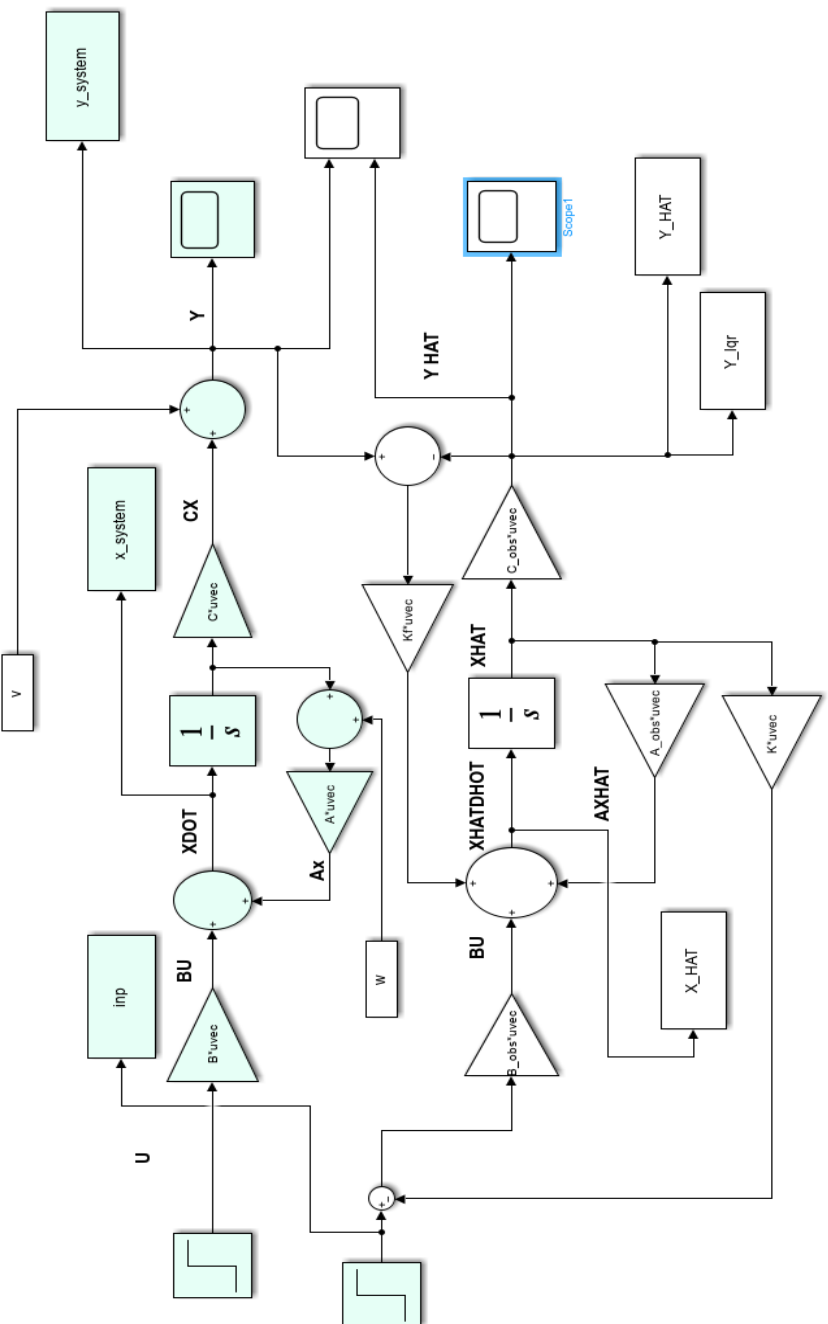
Algoritma pemrograman 4. Pemrograman LQR	
1	Memberi pemrograman dengan nama program LQR.m
2	Inisialisasi sistem dengan Membuat perintah <code>clc</code> ; <i>clear all</i> ; <i>close all</i> ;(membersihkan <i>command window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup semua jendela <i>figure</i> terbuka)
3	Membuat “data_sistem_suspensi.mat” yang telah disimpan pada pemrograman 1 keruang kerja matlab.
4	Memuat data <i>noise</i> ke MATLAB
5	Perancangan Matriks Q dan R
6	Perancangan Kendali LQR dengan perintah <code>lqr</code> di MATLAB
7	Panggil dan jalankan Simulink dengan nama Suspensi_LQR
8	Visualisasi hasil dalam bentuk grafik

10. Desain sistem suspensi yang ditambahkan LQR dan Kalman filter

Setelah semua dirancang selanjutnya adalah Penggabungan antara pengendali dan *observer*. Berikut adalah blok *simulink* untuk perancangan

Gambar 3. 6 Desain sistem suspensi ditambahkan Kalman dan LQR





Gambar 3. 7 Simulink Sistem suspensi yang ditambahkan LQR dan Kalman filter

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Berikut adalah Algoritma pemograman gambar 3.7

Tabel 3. 5 Algoritma pemograman sistem suspensi ditambahkan LQR dan Kalman filter

Algoritma pemrograman 2. Pemrograman <i>noise</i>	
1	Mulai
2	Inisialisasi sistem Membuat perintah <i>clc</i> ; <i>clear all</i> ; <i>close all</i> ;(membersihkan <i>command window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup semua jendela <i>figure</i> terbuka)
3	Membuat “data_sistem_suspensi” yang telah disimpan pada pemograman 1 keruang kerja matlab.
4	Mendefenisikan σ_w (<i>noise</i> untuk <i>state</i>) dengan $\max(y_sistem)$ dan mendefenisikan σ_v (<i>noise</i> untuk pengukuran) dengan $\max(x_sistem) * 0.06$ atau (6%).
5	Menetapkan kondisi awal(IC)
6	Perancangan Kalman filter
7	Perancangan Pengendali LQR
8	Memanggil blok <i>simulink</i>
9	Menampilkan hasil
10	Selesai

Setelah sistem selesai ditambahkan LQR dan kalman, langkah selanjutnya adalah melakukan analisa terhadap sistem

11. Analisa Hasil

Langkah berikutnya adalah menganalisis hasil simulasi untuk memastikan tujuannya tercapai. Analisis ini memeriksa apakah pengendali LQR berhasil mengendalikan sistem secara optimal, dan apakah *observer* Kalman filter mampu memberinya estimasi sistem yang akurat, terutama ketika ada gangguan atau perubahan kondisi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem suspensi aktif model *quarter car* berhasil dibangun dalam bentuk model ruang keadaan dan mampu menggambarkan perilaku dinamis bodi serta roda kendaraan ketika menghadapi berbagai gangguan permukaan jalan, seperti *speed bump*, *speed hump*, dan jalan berlubang. Pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) yang dirancang berperan sebagai pengendali tipe regulator yang efektif dalam mengarahkan defleksi suspensi kembali ke titik keseimbangan atau setpoint nol setelah sistem mengalami gangguan. Hal ini menunjukkan bahwa LQR memiliki kemampuan yang baik dalam meredam getaran akibat variasi kondisi jalan. Namun demikian, pada kondisi sistem yang dipengaruhi oleh noise pengukuran, kinerja LQR tanpa estimator menunjukkan penurunan yang ditandai dengan respon yang lebih berosilasi dan kurang halus. Penerapan Kalman Filter sebagai observer memungkinkan diperolehnya estimasi state sistem yang lebih akurat sehingga pengaruh noise dapat ditekan. Dengan mengombinasikan LQR dan Kalman Filter, respon sistem menjadi lebih stabil, lebih halus, serta lebih tahan terhadap gangguan jalan dan variasi noise. Oleh karena itu, perancangan pengendali LQR dan observer Kalman Filter pada sistem suspensi aktif *quarter car* dapat dikatakan berhasil dalam menjawab rumusan masalah serta mencapai tujuan penelitian untuk meredam guncangan akibat berbagai variasi profil jalan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil rancangan dan simulasi yang telah dilakukan, beberapa saran dapat diajukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Model suspensi yang digunakan masih berupa model *quarter car*, sehingga penelitian ke depan dapat dikembangkan menggunakan model *half car* atau *full car* agar dinamika kendaraan yang lebih kompleks. Selain itu, pendekatan kendali yang digunakan dapat diperluas dengan menerapkan dan membandingkan metode lain, seperti *Linear Quadratic Integral* (LQI), *Model Predictive Control* (MPC), atau kendali adaptif, terutama jika dibutuhkan kemampuan sistem untuk mengikuti referensi non-nol. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk menggunakan model gangguan dan *noise* yang lebih mendekati kondisi nyata, misalnya dengan

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

memanfaatkan data hasil pengukuran sensor atau profil jalan aktual. Di samping itu, proses penentuan parameter bobot pada pengendali LQR dapat dioptimalkan menggunakan metode optimasi tertentu guna memperoleh performa sistem yang lebih baik.

Meskipun Kalman Filter banyak digunakan dalam sistem kendali modern karena kemampuannya dalam mengestimasi state secara optimal, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan agar analisis sistem menjadi lebih objektif dan seimbang. Salah satu kelemahan utama Kalman Filter adalah ketergantungannya terhadap akurasi model matematis sistem. Kalman Filter mengasumsikan bahwa model sistem yang digunakan merepresentasikan kondisi sebenarnya secara tepat. Pada sistem suspensi quarter car, ketidakakuratan parameter seperti massa sprung, massa unsprung, konstanta pegas, dan koefisien redaman dapat menyebabkan hasil estimasi state menjadi kurang akurat [33]. Selain itu, kinerja Kalman Filter sangat dipengaruhi oleh pemilihan matriks kovarians noise, yaitu matriks noise proses (Q) dan noise pengukuran (R). Penentuan nilai Q dan R yang tidak tepat dapat mengakibatkan estimasi state menjadi lambat, berosilasi, atau bahkan divergen. Dalam praktiknya, penentuan matriks ini sering dilakukan secara trial and error, sehingga menjadi salah satu keterbatasan Kalman Filter dalam implementasi sistem nyata [34].

Kalman Filter juga bekerja optimal dengan asumsi bahwa gangguan dan noise pengukuran bersifat white noise dan berdistribusi Gaussian. Namun, pada sistem suspensi kendaraan nyata, gangguan akibat kondisi permukaan jalan umumnya bersifat non-Gaussian dan tidak terdistribusi secara ideal. Hal ini dapat menurunkan performa estimasi Kalman Filter ketika diaplikasikan pada kondisi operasional yang bervariasi [35]. Selain itu, Kalman Filter konvensional dirancang untuk sistem linear dan kurang adaptif terhadap perubahan parameter sistem maupun sifat nonlinier yang sering terjadi pada sistem suspensi kendaraan, seperti perubahan karakteristik redaman dan beban kendaraan. Kondisi ini dapat menyebabkan performa estimasi menurun apabila sistem mengalami variasi parameter yang signifikan [36].

Dari sisi implementasi, Kalman Filter memiliki kompleksitas komputasi yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan observer sederhana, karena melibatkan perhitungan matriks kovarians secara berulang. Hal ini dapat menjadi kendala apabila sistem diterapkan pada perangkat keras dengan keterbatasan sumber daya komputasi [33].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Kbarek and H. Riupassa, "Analisis Getaran Suspensi Mobil Mitsubishi Fuso 125 PS Akibat Profil Jalan Sinusoidal," *DINAMIS*, vol. 16, no. 1, pp. 104-110, 2019.
- [2] S. J. Timbang and A. M. Mangande, "Peningkatan Sistem Pengontrolan Gerak Alat Uji Suspensi Kendaraan Roda Empat Menggunakan Sensor Proximity Switch," Politeknik Negeri ujung Pandang, 2023.
- [3] H. Hendrianto, I. Haryanto, and T. Prahasto, "Analisis Performa Suspensi Mobil Sedan Pada Saat Cornering Melalui Metode Multibody Dynamics (Mbd)," *JURNAL TEKNIK MESIN*, vol. 11, no. 4, pp. 79-86, 2023.
- [4] M. F. Fahmi and D. T. Laksono, "Simulasi Kendali Sistem Suspensi Aktif Kendaraan Roda Empat Menggunakan Metode Full State Feedback dan PID," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 9, no. 3, pp. 125-129, 2022.
- [5] F. I. Abdi, "Desain Dan Analisis Sistem Suspensi Aktif Model Seperempat Kendaraan Dengan Kendali Pid (Proportional Integral Derivative)," 2017.
- [6] S. Nurrahma, T. A. Berbudi, M. R. Firdaus, G. Izzaulhaq, and I. Hudati, "Implementasi Kontrol PID pada Kopel Motor DC dengan Menggunakan Filter Kalman," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [7] K. Mashudi, "Desain pengendali hybrid fuzzy–proportional, integral, derivative (pid) pada suspensi seperempat kendaraan," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2022.
- [8] M. A. Adiguna and B. W. Widagdo, "Implementasi Logika Fuzzy Pada Pengaruh Penggunaan Aplikasi Simulasi Cisco Packet Tracer Terhadap Gairah Belajar Mahasiswa," *Komputa: Jurnal Ilmiah Komputer dan Informatika*, vol. 12, no. 1, pp. 19-28, 2023.
- [9] Y. Efprianto, "Perancangan dan Simulasi Sistem Pengendali Panel Surya dengan Metode Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC)," *Final Project Jurusan Matematika, FMIPA, Surabaya*, 2015.
- [10] A. Basuki, S. Sumardi, and I. Setiawan, "Pengaturan Kecepatan Motor DC secara Real Time Menggunakan Teknik Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)," Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, 2011.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [11] N. H. N. Hibban *et al.*, "Analisis Sistem Kendali Anti-Sway pada Gantry Crane Menggunakan Linear Quadratic Regulator (LQR) Dan PID," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 12, no. 2, pp. 325-335, 2025.
- [12] F. Rohadatul'Aisy, "Perancangan pengendali linear quadratic regulator (lqr)–pd untuk mengendalikan konsentrasi pada isothermal continuous stirred tank reactor (cstr)," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2022.
- [13] A. Faizal, E. Safitri, and R. Kurniawan, "Pengendalian Suspensi Kendaraan menggunakan Pengendali Sliding Mode Control dan Proporsional Integral Derivative," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 9, no. 1, pp. 49-56, 2022.
- [14] Y. Yudhi Fariztian, "Performansi Luenberger Observer dalam Mengestimasi Konsentrasi pada Continuoius Stirred Tank Reactor (CSTR)," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
- [15] M. Zoni and A. Arzul, "Perancangan Full Order Observer Pada Sistem Sliding Mode Control Untuk Mengatasi Anti-Windup Berbasis LMI," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro UIN Sunan Gunung Djati Bandung*, 2018, pp. 1-12.
- [16] A. Adriansyah, "Analisa performansi estimasi dan simulasi sistem suspensi seperempat mobil menggunakan Kalman–Bucy sebagai state observer," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2025.
- [17] A. Maarif, R. D. Puriyanto, and F. R. T. Hasan, "Robot keseimbangan dengan kendali proporsional-integral-derivatif (PID) dan Kalman filter," *IT Journal Research and Development*, vol. 4, no. 2, 2020.
- [18] I. Hudati, N. I. Wijayakusuma, A. Y. Ismail, A. A. P. Barus, and H. Budianto, "Kontrol motor dc dengan kendali linear quadratic regulator dan filter kalman menggunakan gui matlab," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [19] D. O. Prasetya, M. S. Zuhrie, B. Suprianto, and E. Endryansyah, "Desain dan analisis sistem suspensi aktif model seperempat kendaraan dengan metode hybrid PID-Fuzzy," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 343-350, 2022.
- [20] D. D. Mursyitah, E. E. Ismaredah, and A. Al Kautsar, "Desain Pengendali LQR-PID Untuk Mengendalikan Getana Pada Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan (Quarter Car)," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri*, pp. 518-525.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

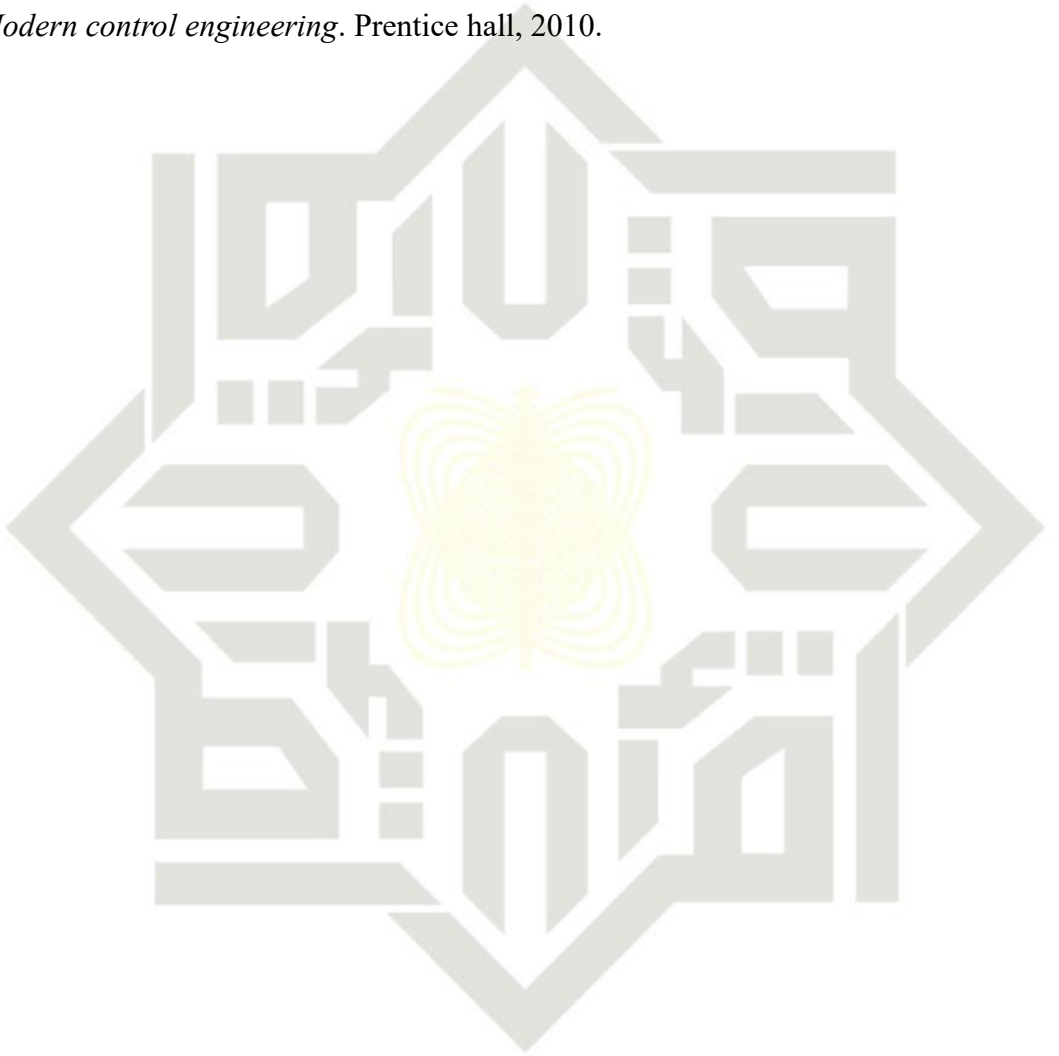
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

- [21] G. A. Muthi, S. Sumardi, and I. Setiawan, " Perancangan pengaturan sistem suspensi aktif pada model kendaraan setengah dengan menggunakan metoda kontrol optimal LQR," Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, 2011.
- [22] A. Rozak, "Sistem kendali suhu otomatis untuk proses sterilisasi susu dengan metode konvensional menggunakan kontrol pid berbasis Arduino Mega 2560 dengan telemetri," Universitas Negeri Jakarta, 2015.
- [23] S. S. Edie, "Desain Dan Analisis Kendali Sistem Suspensi Menggunakan Pid Dan Logika Fuzzy Dengan Simulink Matlab," *Unnes Physics Journal*, vol. 4, no. 1, 2015.
- [24] A. Aristianto, S. Sumardi, and D. Darjat, " Aplikasi fuzzy logic control pada sistem suspensi semi-aktif model kendaraan seperempat," Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip, 2011.
- [25] S. Ananda, "Pemodelan Matematis dalam Desain Sistem Kendali Otomatis untuk Proses Manufaktur," *Jurnal Dunia Ilmu*, vol. 3, no. 7, 2023.
- [26] H. F. S. Harahap, "Implementasi Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 14 Tahun 2021 tentang alat pengendali dan pengaman pengguna jalan (studi kasus Kecamatan Padangsidempuan Selatan Kota Padangsidempuan)," UIN Syekh Ali Hasan Ahmad Addary Padangsidempuan, 2024.
- [27] A. Adiyatma, "Perancangan Model Kompensator Dan Plant Pada Sistem Kendali Konvensional Menggunakan Komputer Analog," Universitas Brawijaya, 2012.
- [28] R. Firdiansyah and R. P. Eviningsih, "Analysis of Optimal Control Using the Linear Quadratic Regulator (LQR) Method in DC Motors: Relevance to Community Engagement Programs," *Maritime in Community Service and Empowerment*, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, 2023.
- [29] E. Purnaningrum, "Pendekatan Metode Kalman Filter untuk Peramalan Pergerakan Indeks Harga Saham Terdampak Pandemi Coronavirus," *Majalah Ekonomi*, vol. 25, no. 2, pp. 103-109, 2020.
- [30] I. S. H. Sujoto and H. Sutiksno, "Studi Analisa Kalman Filter Sebagai State Estimator Untuk Meningkatkan Akurasi Pengukuran Kecepatan Motor DC," *Journal of Information System, Graphics, Hospitality and Technology*, vol. 3, no. 01, pp. 9-18, 2021.
- [31] Z. Busrah, "Matematika Komputasi Berbasis Pemrograman Matlab," ed: Percetakan Kaaffah, 2019.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- [32] A. M. Matlab, "Bab 1 pengenalan MATLAB."
- [33] B. Friedland, *Control system design: an introduction to state-space methods*. Courier Corporation, 2012.
- [34] D. Simon, *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons, 2006.
- [35] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," 1960.
- [36] K. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice hall, 2010.



UIN SUSKA RIAU