



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

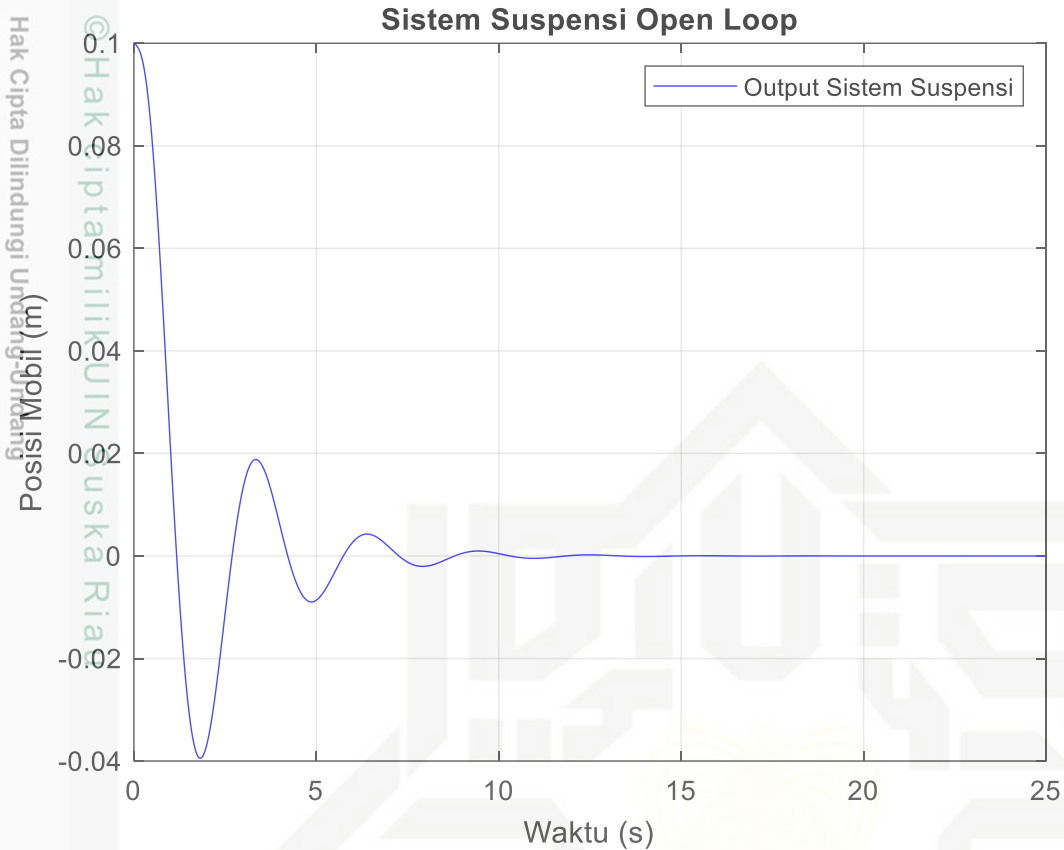
4.1 Tinjauan Umum Terhadap Hasil Analisis dan Pengujian

Pada bab sebelumnya telah membahas perancangan sistem suspensi seperempat kendaraan dengan menggunakan Luenberger *Observer* sebagai *state observer* dan pengendali PID. Selain itu, telah disusun algoritma pemrograman yang akan digunakan dalam pengujian. Pada bab ini, akan dijelaskan hasil pengujian yang dilakukan menggunakan MATLAB R2023a untuk mengevaluasi performa Luenberger *Observer* pada pengendali PID dalam mengestimasi keluaran sistem. Adapun beberapa pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Analisa Hasil Sistem Suspensi Secara *Open Loop*.
2. Analisa Performansi Luenberger *Observer* dalam Mengestimasi Posisi Mobil.
 - a. Analisa Sensitivitas Terhadap Perubahan Kondisi Awal.
 - b. Analisa Sensitivitas Terhadap Perubahan *Input*.
 - c. Analisa Kekokohan Terhadap *Noise*.
3. Analisa Performansi Sistem Suspensi Terhadap Pengendali PID & Luenberger *Observer*,

4.2 Analisa Hasil Sistem Suspensi Secara *Open Loop*

Pemilihan nilai kondisi awal sebesar 0,1 meter (10 cm) dalam simulasi sistem suspensi mobil didasarkan pada pertimbangan empiris yang mengacu pada rentang ketinggian gangguan jalan yang lazim ditemui di lapangan, sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.3. Berdasarkan referensi tersebut, *speed hump* memiliki ketinggian antara 5 hingga 9 cm, sementara *speed bump* berkisar antara 8 hingga 15 cm dan lubang dengan kedalaman 10 cm. Oleh karena itu, pemilihan nilai 10 cm berada dalam rentang yang wajar dan representatif terhadap gangguan vertikal akibat permukaan jalan yang tidak rata, yang berpotensi menimbulkan simpangan awal pada posisi bodi kendaraan. Nilai tersebut dipilih untuk menciptakan kondisi awal sistem yang tidak berada dalam keadaan kesetimbangan. Berikut hasil keluaran sistem suspensi secara *open loop* dengan kondisi awal sebesar 0,1 meter:



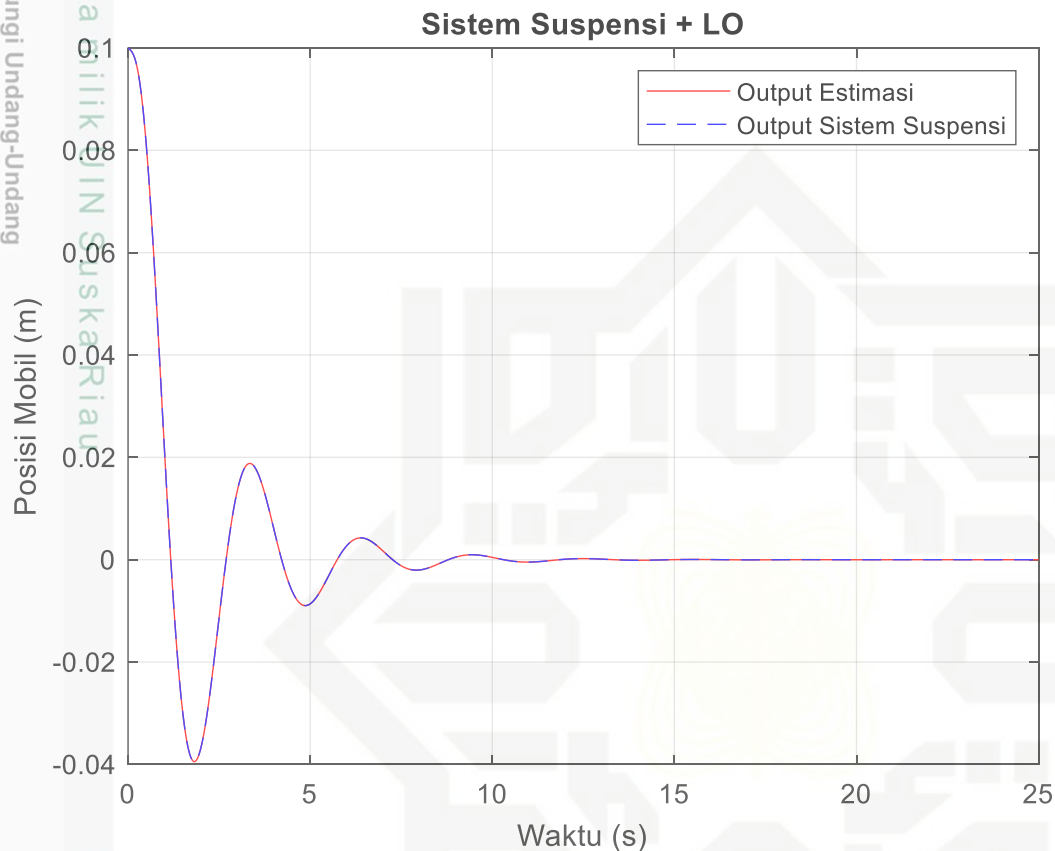
Gambar 4.1 Hasil Keluaran Sistem Suspensi Secara *Open Loop*

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Sistem Suspensi Secara *Open Loop*

Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	39.45 %
<i>Rise Time</i>	0.7096 detik
<i>Settling Time</i>	8.0057 detik
<i>Time Delay</i>	0.77 detik

Gambar 4.1 memperlihatkan respons keluaran sistem suspensi dalam kondisi *open loop*, dengan kondisi awal sebesar $[0.1; 0; 0; 0]$. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa kendaraan mengalami perubahan posisi akibat adanya gangguan dari permukaan jalan, dan membutuhkan waktu sekitar 11 detik untuk mencapai kondisi stabil, yaitu mendekati posisi nol. Hasil simulasi ini mencerminkan perilaku sistem suspensi secara realistis, sebagaimana yang dapat terjadi dalam kondisi operasional di dunia nyata. Dengan demikian, model simulasi sistem suspensi yang digunakan dapat dianggap valid dan layak untuk digunakan pada tahap analisis performa *state observer*, yaitu Luenberger *Observer*.

Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem suspensi dalam kondisi *open loop* dengan penambahan *observer*, yaitu Luenberger *Observer*, untuk menguji serta memvalidasi kemampuan *observer* dalam mengestimasi posisi mobil. Adapun hasil keluaran dari sistem suspensi open loop dengan penambahan *observer* disajikan sebagai berikut:



Gambar 4.2 Hasil Estimasi Menggunakan Luenberger *Observer*.

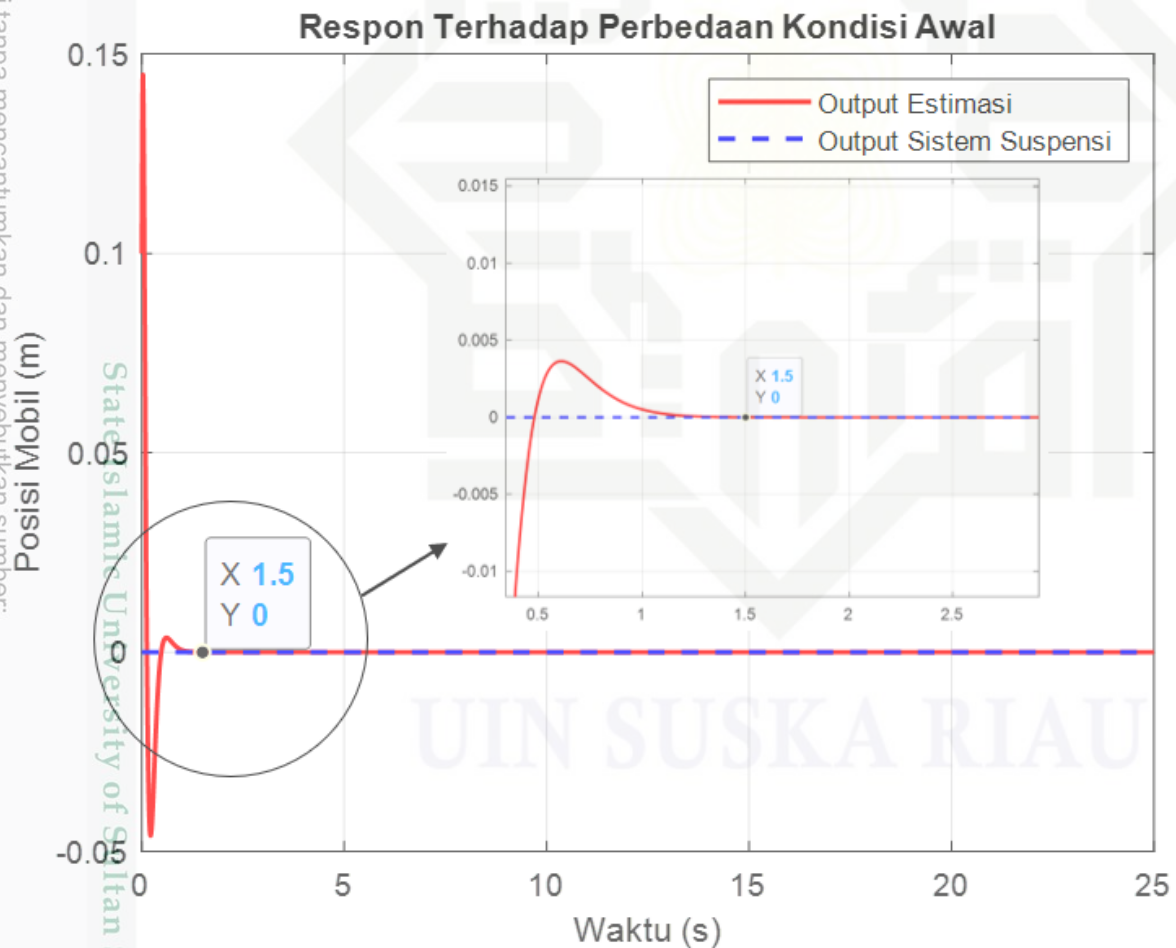
Gambar 4.2 menunjukkan hasil simulasi keluaran sistem suspensi yang telah dilengkapi dengan Luenberger *Observer* sebagai *state observer*. Pada skenario ini, kondisi awal sistem dan *observer* disamakan, yaitu $[0.1; 0; 0; 0]$, dengan durasi simulasi selama 25 detik. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa *observer* mampu mengikuti dan mengestimasi keadaan sistem secara konsisten sejak awal hingga akhir simulasi. Grafik berwarna merah merepresentasikan estimasi posisi oleh Luenberger *Observer*, yang terlihat mampu mengikuti dinamika sistem secara akurat. Estimasi tersebut sejalan dengan grafik keluaran sistem yang ditunjukkan oleh garis biru putus-putus. Analisis ini bertujuan untuk memvalidasi tolak ukur awal bahwa Luenberger *Observer* mampu mengestimasi keluaran sistem secara akurat. Hasil ini kemudian menjadi dasar untuk melanjutkan ke tahap



pengujian berikutnya, yaitu pengujian sensitivitas terhadap perubahan kondisi awal. Pada tahap tersebut, kondisi awal antara sistem dan *observer* dibuat berbeda untuk mengevaluasi seberapa cepat dan akurat *observer* dalam melakukan estimasi terhadap keadaan sistem.

4.3 Analisa Sensitivitas Luenberger *Observer* Terhadap Perbedaan Kondisi Awal

Pengujian sensitivitas terhadap perubahan kondisi awal ini bertujuan untuk mengevaluasi respons *observer* terhadap perbedaan kondisi awal antara sistem dan *observer*. Tujuan lainnya adalah untuk menilai seberapa cepat dan akurat Luenberger *Observer* dapat mengestimasi keadaan sistem, meskipun terdapat selisih nilai awal antara kedua kondisi tersebut. Rangkaian pengujian disajikan pada Tabel 3.2, di mana pada pengujian pertama digunakan kondisi awal sistem sebesar $[0; 0; 0; 0]$, sedangkan kondisi awal *observer* (Luenberger *Observer*) adalah $[0.1; 0; 0; 0]$. Adapun hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada uraian berikut:

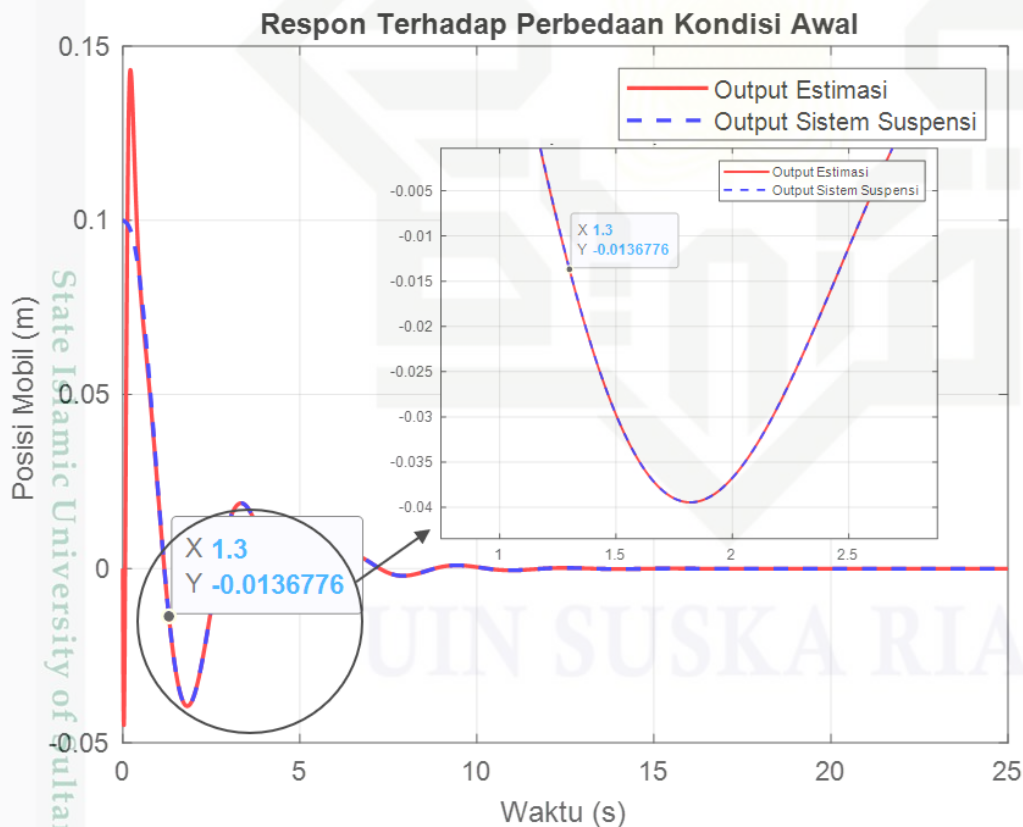


Gambar 4.3 Hasil Keluaran Terhadap Perbedaan Kondisi Awal IC_obs $[0.1; 0; 0; 0]$



Berdasarkan Gambar 4.3, dilakukan pengujian awal sensitivitas Luenberger *Observer* dengan memberikan kondisi awal sebesar $[0; 0; 0; 0]$ pada sistem, sementara *observer* diberikan kondisi awal sebesar $[0.1; 0; 0; 0]$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa, meskipun terdapat perbedaan kondisi awal antara sistem dan *observer*, Luenberger *Observer* tetap mampu mengikuti atau mengestimasi keluaran sistem dengan baik. Dari simulasi tersebut terlihat bahwa pada waktu 1,5 detik, keluaran *observer* telah berhasil menyamai keluaran sistem secara akurat. Temuan ini mengindikasikan bahwa Luenberger *Observer* sangat sensitif terhadap perbedaan kondisi awal dan tetap mampu melakukan estimasi dengan tingkat ketelitian yang baik.

Untuk memvalidasi sensitivitas tersebut, dilakukan pengujian lanjutan dengan membalik kondisi awal, yaitu sistem diberi kondisi awal sebesar $[0.1; 0; 0; 0]$, sementara *observer* diberi kondisi awal sebesar $[0; 0; 0; 0]$. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengkaji lebih lanjut bagaimana sensitivitas Luenberger *Observer* terhadap variasi kondisi awal memengaruhi akurasi estimasinya. Hasil keluaran dari pengujian tersebut disajikan sebagai berikut:



Gambar 4.4 Hasil Keluaran Terhadap Perbedaan Kondisi Awal IC_obs $[0; 0; 0; 0]$



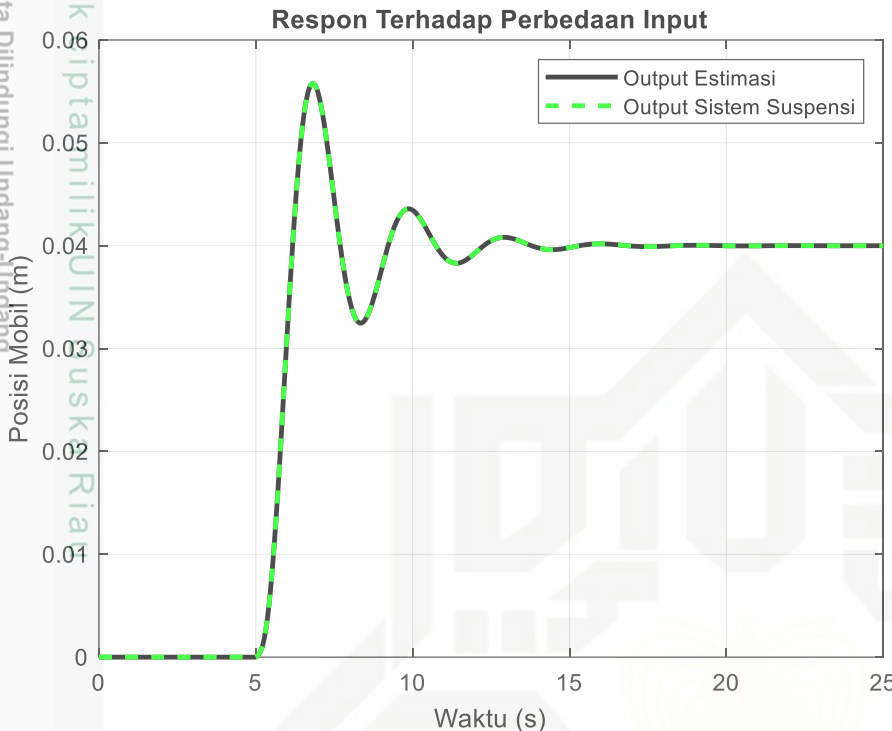
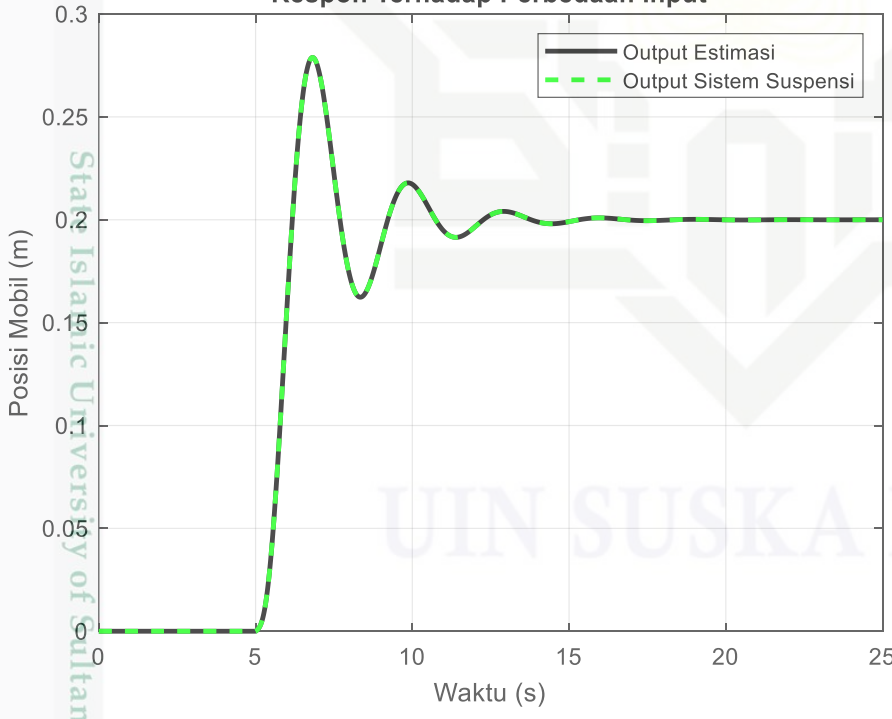
Pada Gambar 4.4, pengujian dilakukan dengan memberikan kondisi awal sebesar $[0.1; 0; 0; 0]$ pada sistem dan $[0; 0; 0; 0]$ pada *observer*, dengan durasi simulasi selama 25 detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Luenberger *Observer* tetap mampu mengestimasi keluaran sistem secara akurat. Bahkan, waktu konvergensi estimasi tetap berada pada 1,3 detik, sama seperti pada pengujian sebelumnya. Pada grafik, garis berwarna merah merepresentasikan hasil estimasi dari Luenberger *Observer*, sedangkan garis berwarna biru menunjukkan keluaran aktual dari sistem. Temuan ini semakin memperkuat bahwa Luenberger *Observer* memiliki sensitivitas terhadap perbedaan kondisi awal, namun perbedaan tersebut tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap akurasi estimasi. Dengan demikian, pengujian ini mendukung kesimpulan bahwa Luenberger *Observer* memiliki sensitivitas terhadap variasi kondisi awal.

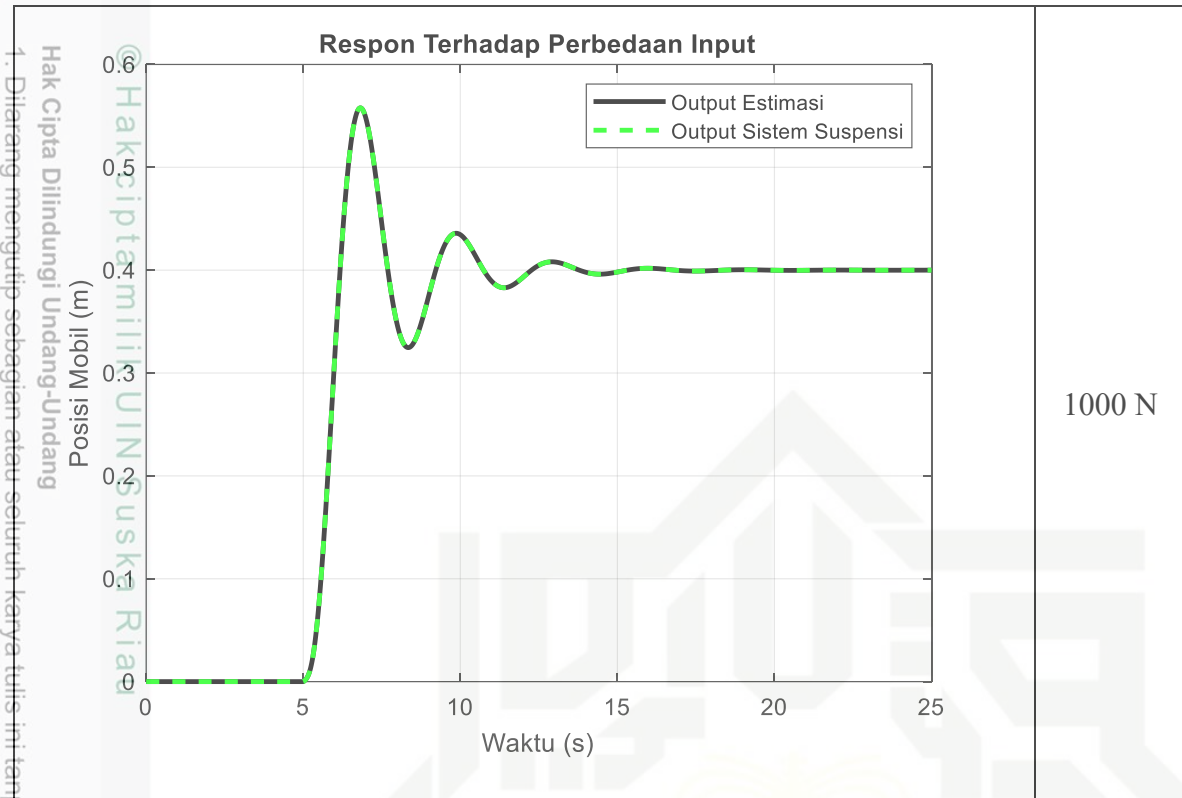
4.4 Analisa Sensitivitas Luenberger *Observer* Terhadap Perubahan *Input*

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas Luenberger *Observer* terhadap variasi *input* gaya $u(t)$, tanpa melibatkan pengendali PID. Dengan kata lain, pengujian dilakukan untuk menilai tingkat akurasi *observer* dalam mengestimasi keadaan sistem ketika diberikan gaya masukan dengan besaran yang berbeda.

Pada skenario ini, sistem diuji menggunakan beberapa nilai gaya *input* dalam bentuk sinyal step, yaitu sebesar 100 N, 500 N, dan 800 N, gaya diberikan secara langsung ke sistem mulai dari detik ke-5 dengan durasi simulasi selama 25 detik. Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa Luenberger *Observer* dapat diandalkan dalam penerapan sistem kendali tertutup (*closed-loop*) pada tahap selanjutnya. Adapun hasil keluaran terhadap perubahan *input* disajikan sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Keluaran Terhadap Perubahan *Input*

Hasil Keluaran Terhadap Perubahan <i>Input</i>		<i>Input</i> (F)
<p>1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:</p> <p>a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.</p> <p>b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.</p> <p>2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.</p>		100 N
		500 N



Tabel 4.2 menyajikan hasil simulasi respons sistem suspensi terhadap variasi gaya masukan sebesar 100 N, 500 N, dan 1000 N, yang diberikan dalam bentuk gaya impulsif dari arah bawah. Penting untuk dipahami bahwa gaya tersebut tidak merepresentasikan penambahan beban statis dari atas, melainkan menggambarkan gangguan dinamis yang berasal dari permukaan jalan, seperti benturan akibat polisi tidur atau ketidakteraturan jalan lainnya. Oleh karena itu, semakin besar gaya impulsif yang diterapkan dari bawah, maka bodi kendaraan terdorong naik, yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai posisi mobil dalam grafik.

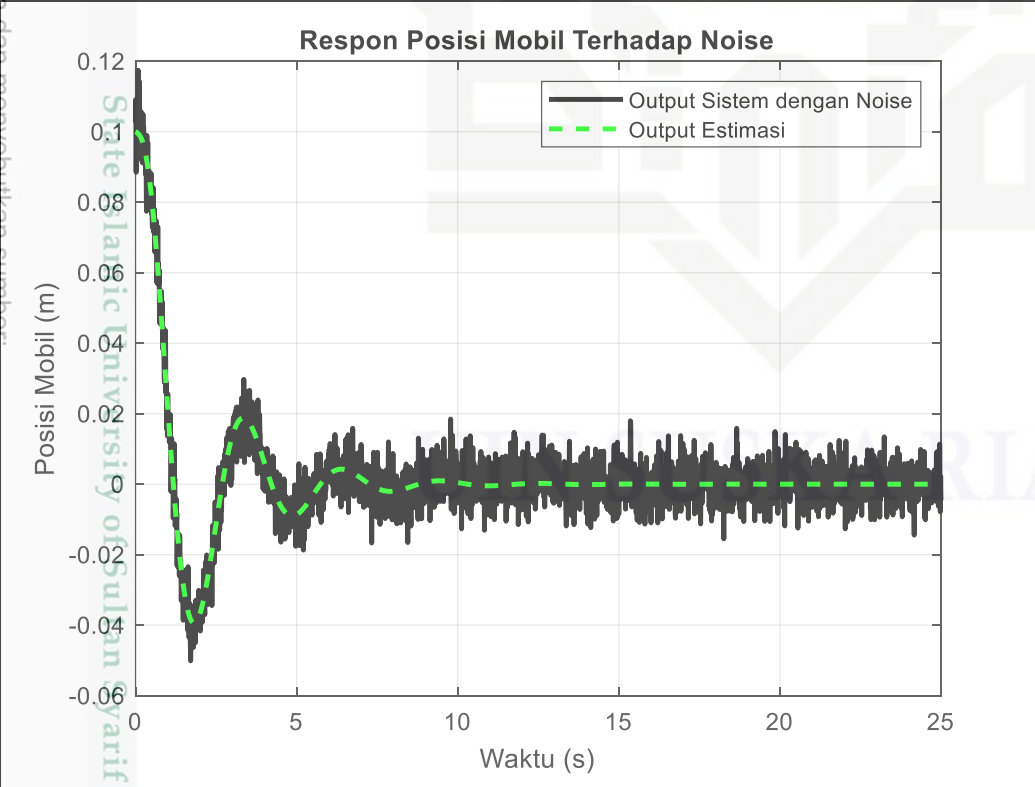
Dari hasil simulasi terlihat bahwa peningkatan besar gaya masukan berbanding lurus dengan peningkatan amplitudo simpangan posisi bodi kendaraan. Karakteristik ini menunjukkan bahwa sistem bersifat linier, di mana respons output meningkat seiring bertambahnya nilai *input*. Pada gaya *input* 100 N, simpangan maksimum yang dicapai sekitar 0,05 meter, sementara pada gaya 500 N dan 1000 N, simpangan maksimum meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 0,25 meter dan 0,55 meter. Pola ini juga menunjukkan adanya osilasi pada sistem sebelum akhirnya mencapai kondisi tunak, yang merupakan ciri khas respon dinamis akibat gangguan eksternal. Dengan demikian, grafik yang dihasilkan bukan merupakan kesalahan, melainkan merepresentasikan bagaimana sistem suspensi merespons gaya impulsif dari bawah secara fisiologis.

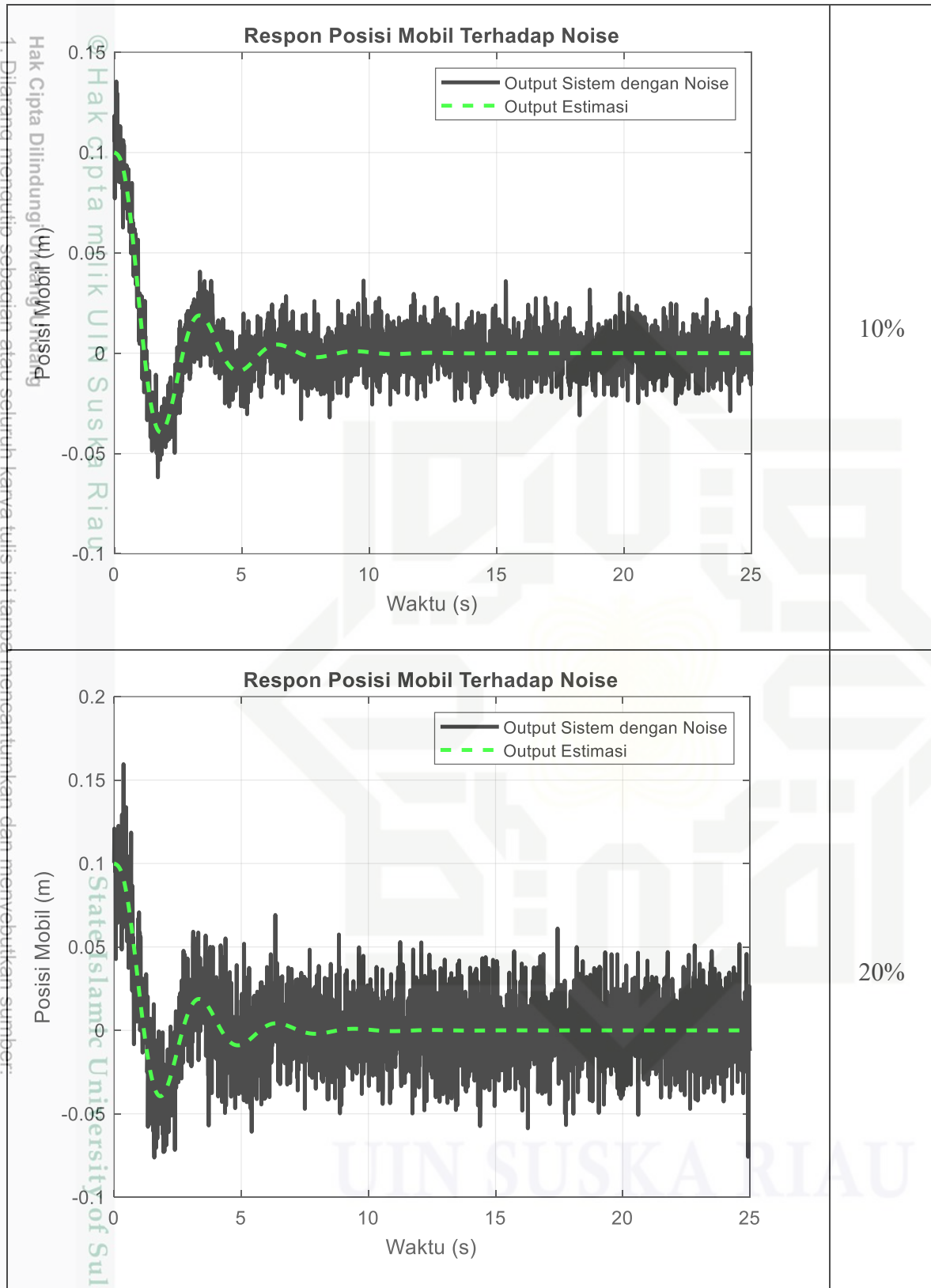
Selanjutnya, hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa Luenberger Observer mampu melakukan estimasi output sistem dengan akurasi tinggi. Hal ini dibuktikan melalui kemiripan bentuk kurva antara hasil estimasi dan output aktual sistem pada ketiga variasi gaya masukan. Dengan demikian, observer yang dirancang terbukti efektif dalam mengikuti perubahan kondisi sistem meskipun terjadi variasi besar gaya *input* secara signifikan.

4.5 Analisa Kekokohan Luenberger Observer Terhadap Gangguan Noise

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan (*robustness*) Luenberger Observer terhadap gangguan eksternal berupa *noise* pada proses pengukuran. Pengujian dilakukan dengan menambahkan sinyal *noise* acak pada *output* sistem, yang merepresentasikan gangguan umum dalam kondisi nyata, seperti getaran mekanis, kesalahan pembacaan sensor, atau interferensi dari lingkungan sekitar. Melalui penambahan *noise* ini, dilakukan analisis terhadap kemampuan *observer* dalam mempertahankan akurasi dan kestabilan estimasi keadaan sistem, meskipun terjadi gangguan yang tidak diinginkan. Hasil keluaran sistem terhadap gangguan *noise* disajikan pada bagian berikut:

Tabel 4.3 Hasil Keluaran Terhadap Gangguan Noise

Hasil Keluaran Terhadap Gangguan Noise		Noise
		5%



Tabel 4.3 menyajikan hasil simulasi respons sistem suspensi mobil terhadap gangguan *noise* pada pengukuran dengan tiga tingkat intensitas yang berbeda, yaitu sebesar 5%, 10%,



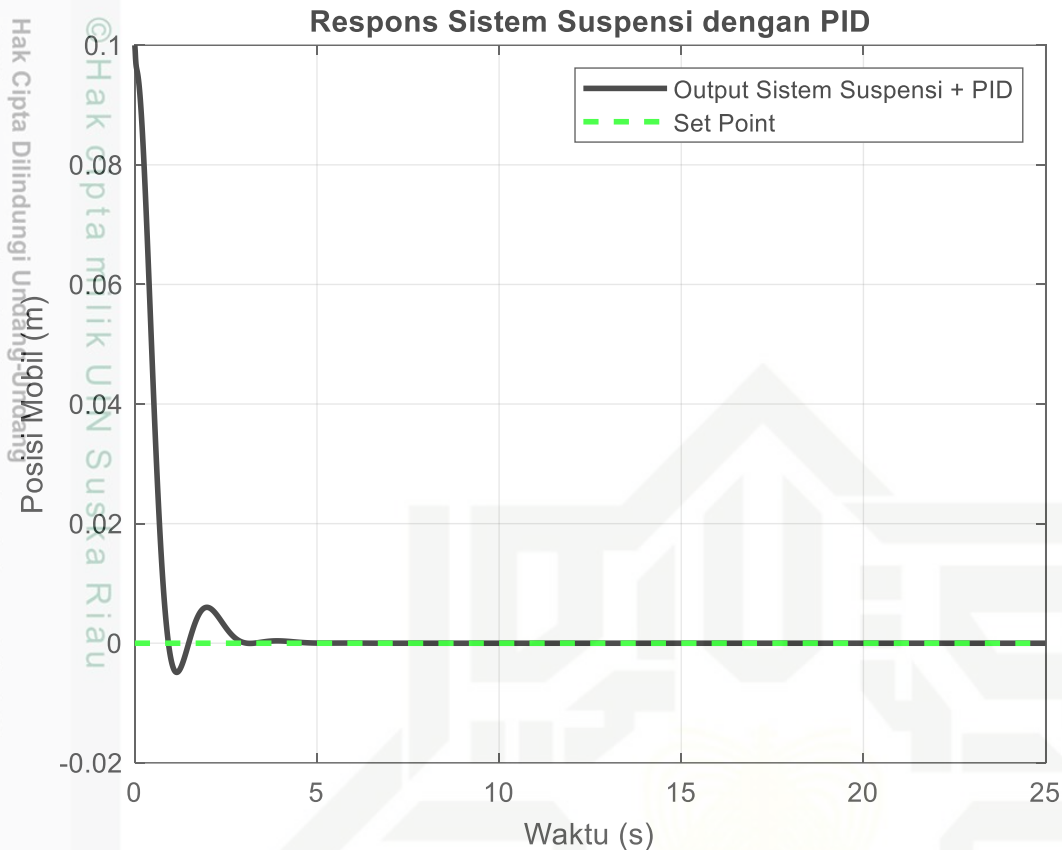
dan 20%. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai kemampuan Luenberger *Observer* dalam mempertahankan akurasi estimasi kondisi sistem ketika data keluaran dari sensor dipengaruhi oleh gangguan berupa sinyal *noise* bertipe *white Gaussian*. Berdasarkan hasil simulasi, pada tingkat *noise* sebesar 5%. Hal ini mengindikasikan bahwa *observer* mampu mereduksi pengaruh *noise* secara efektif dan menjaga kestabilan estimasi sistem.

Saat intensitas *noise* meningkat menjadi 10%, mulai terlihat adanya fluktuasi yang lebih nyata pada sinyal *output* aktual. Meskipun demikian, Luenberger *Observer* tetap mampu menghasilkan estimasi yang cukup halus dan presisi, tanpa menunjukkan penyimpangan atau keterlambatan yang signifikan terhadap dinamika sistem. Pada tingkat *noise* yang lebih tinggi, yaitu 20%, gangguan menjadi semakin dominan dan menghasilkan amplitudo fluktuasi yang cukup besar. Namun demikian, *observer* masih menunjukkan performa yang baik dengan estimasi yang tetap stabil dan mengikuti pola dinamika sistem secara konsisten, meskipun *output* aktual telah terkontaminasi oleh *noise* yang signifikan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa Luenberger *Observer* memiliki tingkat kekokohan (*robustness*) yang tinggi terhadap gangguan *noise* pengukuran. Estimasi yang dihasilkan tetap akurat dan stabil, bahkan pada kondisi gangguan sinyal yang sangat tinggi. Oleh karena itu, *observer* ini layak untuk diterapkan pada sistem kendali tertutup (*closed-loop*), khususnya dalam lingkungan nyata yang rentan terhadap interferensi sinyal dan ketidakakuratan sensor.

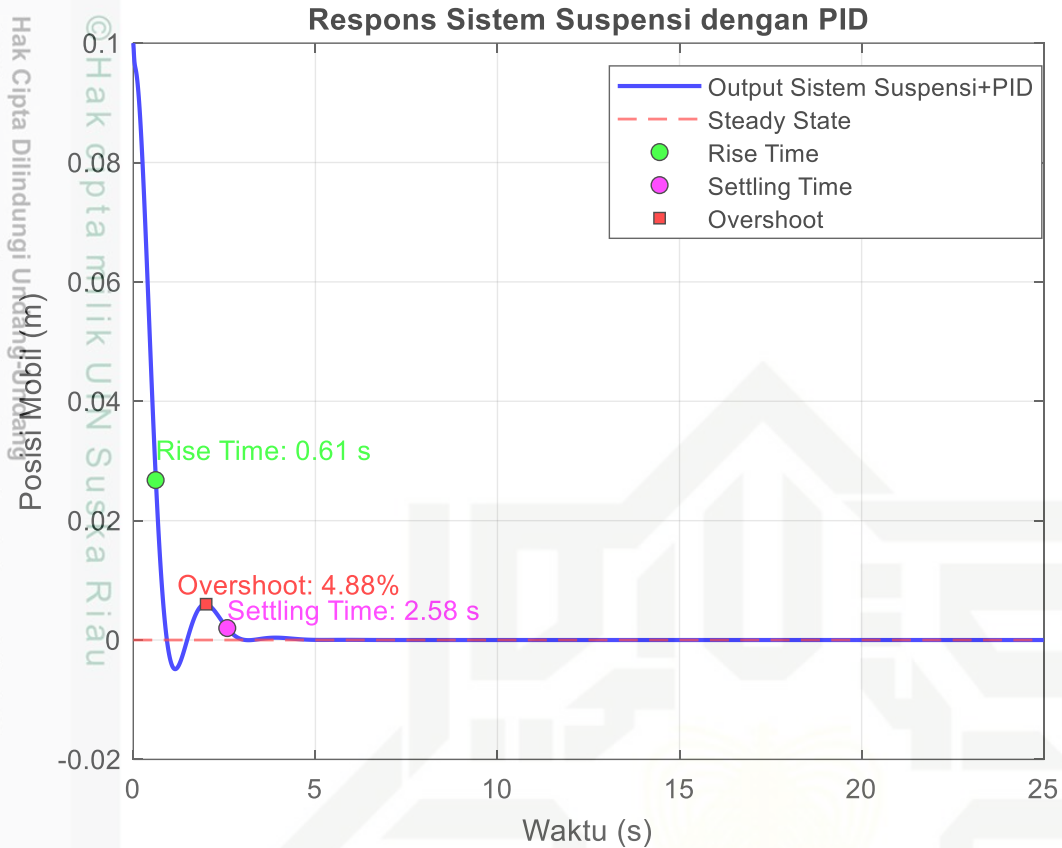
4.6 Analisa Performa Sistem Suspensi Menggunakan Pengendali PID

Analisa kinerja sistem suspensi mobil dilakukan setelah penerapan pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Tujuan utama dari penerapan pengendali PID adalah untuk meningkatkan kestabilan dan respons sistem dalam menghadapi gangguan eksternal, seperti perubahan kontur permukaan jalan atau variasi gaya masukan. Pengendali PID memberikan aksi korektif berdasarkan selisih (*error*) antara keluaran sistem dan nilai referensi yang diinginkan, sehingga sistem dapat mencapai kondisi tunak dengan lebih cepat dan osilasi yang lebih kecil. Evaluasi performa dilakukan dengan membandingkan respons sistem sebelum dan sesudah pengendali PID diterapkan, dilihat dari parameter waktu stabil, amplitudo perpindahan, dan tingkat redaman. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa sistem yang dilengkapi pengendali PID menunjukkan respons yang lebih cepat dan stabil terhadap gangguan, sehingga membuktikan efektivitas pengendali PID dalam meningkatkan performa sistem suspensi secara menyeluruh.



Gambar 4.5 Keluaran Sistem Suspensi Menggunakan PID

Berdasarkan Gambar 4.5, terlihat bahwa sistem suspensi mobil yang dikendalikan oleh pengendali PID dengan parameter $P = 14$, $I = 0.000001$, $D = 96$, dan filter derivatif $N = 100$, menunjukkan respons dinamis yang cukup baik. Pada awal simulasi, sistem mengalami lonjakan nilai posisi (*peak*) yang cukup tinggi 0,1 meter. Namun, lonjakan ini segera mereda dan sistem mulai mencapai kondisi stabil dalam waktu kurang dari 5 detik. Terdapat sedikit *overshoot* dan osilasi ringan pada fase awal, namun hal tersebut dapat diredam secara efektif oleh kontribusi aksi derivatif yang besar. Sementara itu, nilai integral yang sangat kecil menyebabkan pengaruh koreksi kumulatif terhadap kesalahan jangka panjang menjadi sangat terbatas. Dengan demikian, respons sistem lebih banyak dipengaruhi oleh aksi proporsional dan derivatif. Secara keseluruhan, konfigurasi PID yang digunakan menghasilkan respons sistem yang cepat, dengan tingkat *overshoot* yang rendah serta kemampuan peredaman yang baik. Meskipun pengaruh aksi integral sangat minim, sistem tetap menunjukkan karakteristik yang stabil dan responsif terhadap perubahan kondisi awal atau gangguan eksternal.



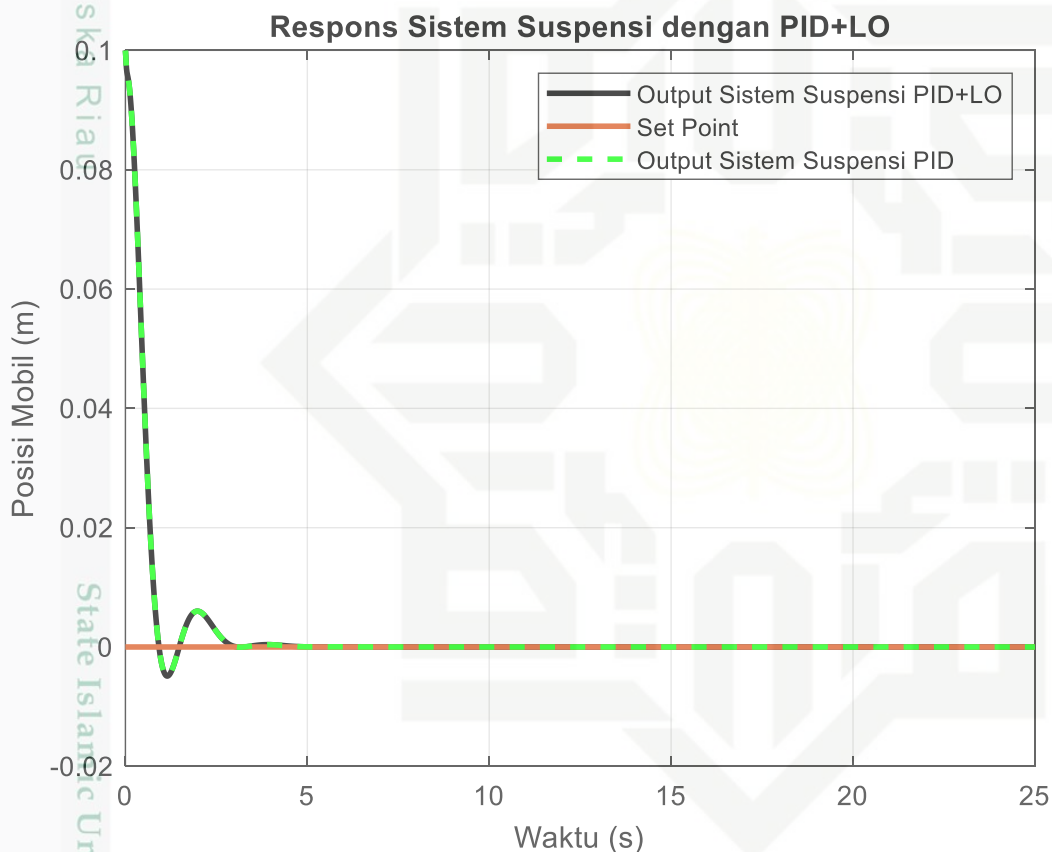
Gambar 4.6 Respon Sistem Suspensi Menggunakan PID

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Sistem Suspensi dengan Pengendali PID

Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	4.88 %
<i>Rise Time</i>	0.6128 detik
<i>Settling Time</i>	2.5755 detik
<i>Time Delay</i>	0.45 detik
<i>RMSE</i>	11.6 %

4.7 Analisa Performa Sistem Suspensi Menggunakan LO dan PID

Setelah diperoleh respons sistem yang optimal, tahap selanjutnya dalam pengembangan sistem kendali adalah mengintegrasikan Luenberger *Observer* dengan pengendali PID. Pendekatan ini bertujuan untuk mengkaji kontribusi Luenberger *Observer* dalam meningkatkan akurasi dan kestabilan sistem melalui estimasi keluaran sistem suspensi yang lebih presisi. Dengan kemampuannya dalam memperkirakan variabel keadaan yang tidak dapat diukur secara langsung, Luenberger *Observer* menyediakan informasi penting yang mendukung kinerja pengendali PID. Hal ini memungkinkan sistem kendali menghasilkan respons yang lebih efisien dan adaptif terhadap dinamika sistem.



Gambar 4.7 Keluaran Sistem Suspensi Menggunakan LO dan PID

Tabel 4.5 Perbandingan Respon Sistem PID dengan LO Terhadap Keluaran Suspensi

Respon Sistem	PID	PID dan LO
<i>Presentase Overshoot</i>	4.88 %	4.88 %
<i>Rise Time</i>	0.6128 detik	0.6128 detik
<i>Settling Time</i>	2.5755 detik	2.5755 detik
<i>Time Delay</i>	0.45 detik	0.45 detik
<i>RMSE</i>	11.6 %	0 %

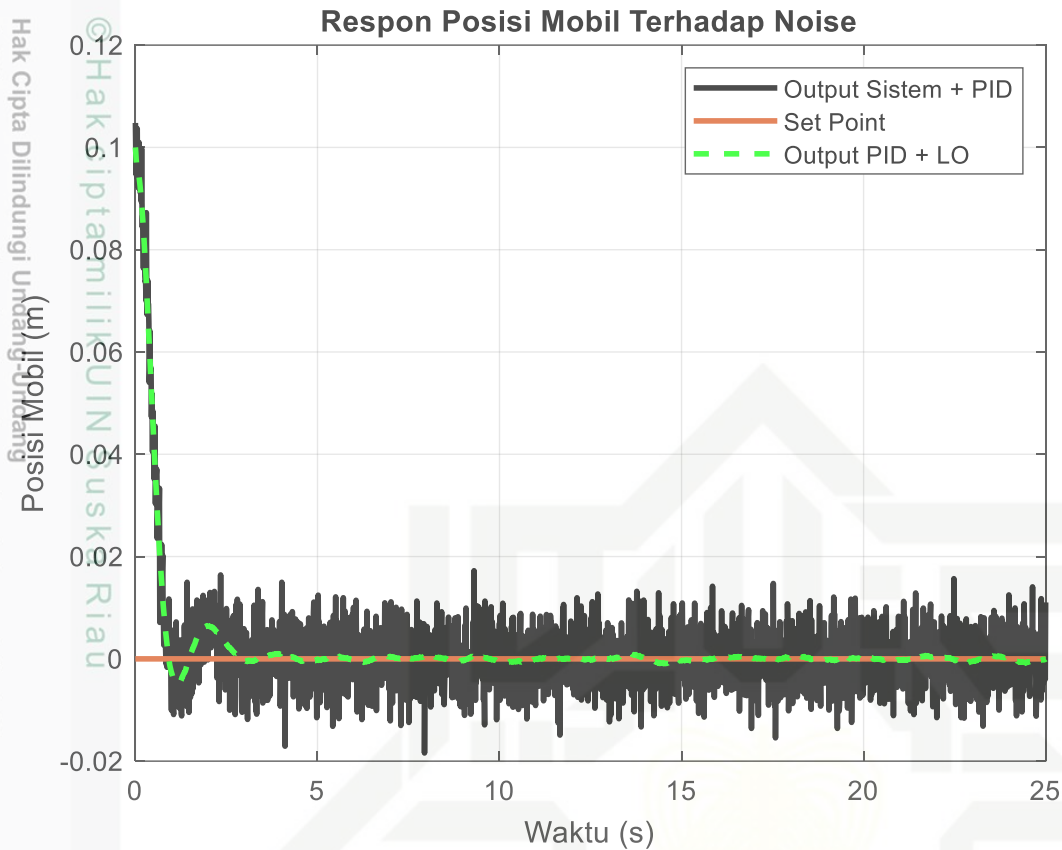


Gambar 4.7 menampilkan perbandingan respons sistem suspensi mobil antara dua konfigurasi kendali, yaitu sistem yang hanya menggunakan pengendali PID dan sistem yang menggabungkan pengendali PID dengan Luenberger *Observer*. Berdasarkan grafik tersebut, kedua konfigurasi menunjukkan respons awal yang hampir serupa, dengan puncak nilai posisi mendekati 0,1 meter serta waktu untuk mencapai kondisi stabil (*settling time*) kurang dari 5 detik. Namun, apabila diamati lebih saksama, sistem yang dilengkapi dengan Luenberger *Observer* menunjukkan osilasi awal yang lebih teredam dan transisi menuju keadaan stabil yang lebih halus dibandingkan sistem dengan pengendali PID saja.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa Luenberger *Observer* berperan dalam meningkatkan akurasi estimasi variabel keadaan yang tidak dapat diukur secara langsung, sehingga mendukung kinerja pengendali PID dalam menghasilkan respons sistem yang lebih stabil dan adaptif. Meskipun perbedaannya tidak terlalu mencolok secara visual, keberadaan *observer* memberikan keunggulan dalam hal ketahanan terhadap gangguan (*noise*) serta keakuratan estimasi sinyal internal, yang sangat krusial dalam sistem kendali berbasis estimasi. Secara keseluruhan, integrasi Luenberger *Observer* dengan pengendali PID terbukti mampu menjaga performa sistem kendali dengan baik, serta menunjukkan potensi peningkatan pada aspek peredaman osilasi dan kestabilan sistem secara keseluruhan.

4.8 Analisa Sistem Suspensi Menggunakan LO dan PID Ketika Diberikan *Noise*

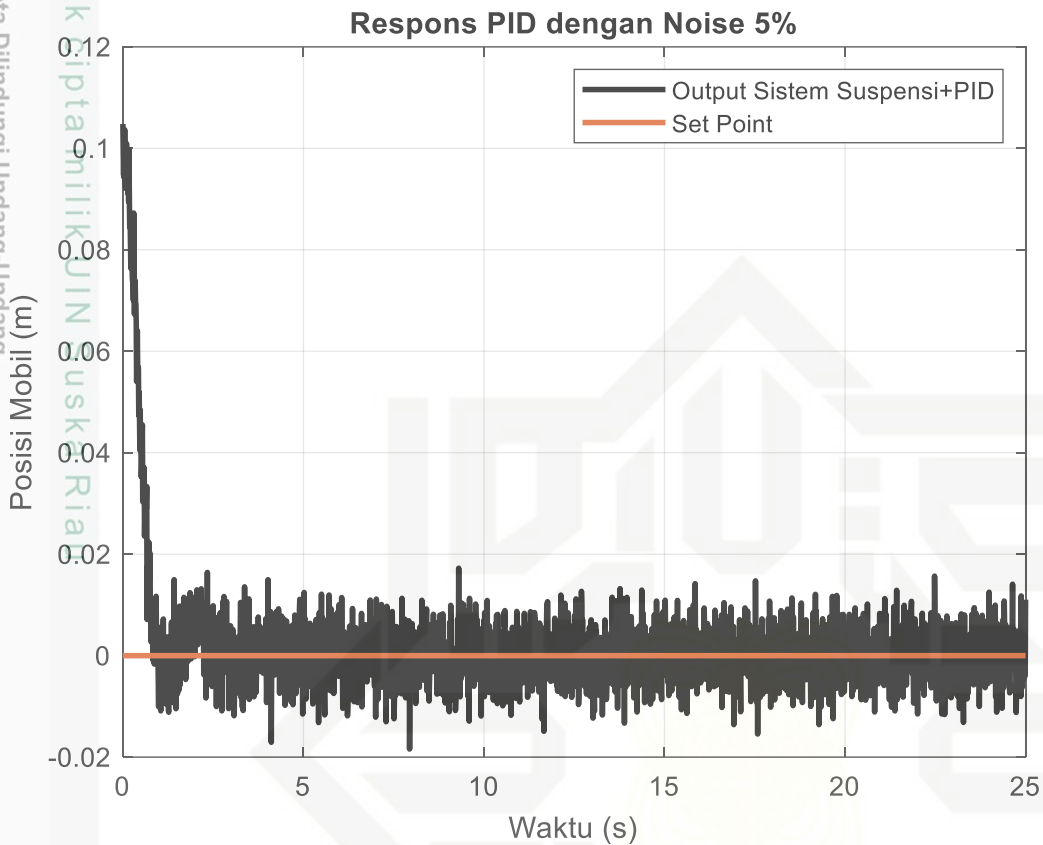
Pengujian dengan penambahan gangguan berupa *noise* dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kekokohan sistem suspensi terhadap gangguan eksternal. Pada pengujian ini, *noise* sebesar 5% disisipkan selama durasi simulasi selama 25 detik dan diintegrasikan ke dalam model Luenberger *Observer* (LO). Hasil dari simulasi tersebut disajikan pada Gambar 4.8. Tujuan utama dari penambahan *noise* ini adalah untuk menilai kemampuan *observer* dalam melakukan estimasi keluaran sistem secara akurat, meskipun sistem berada dalam kondisi yang terganggu. Dengan demikian, dapat diketahui sejauh mana keandalan Luenberger *Observer* dalam menghadapi ketidakpastian atau gangguan dari lingkungan eksternal.



Gambar 4.8 Hasil Keluaran Kombinasi PID & LO Terhadap Gangguan *Noise* 5%

Gambar 4.8 menampilkan respons sistem suspensi mobil terhadap gangguan eksternal berupa *noise* sebesar 5% dengan massa mobil 417,5 kg pada konfigurasi sistem kendali yang menggabungkan pengendali PID dengan Luenberger *Observer* (LO). Dari grafik tersebut terlihat bahwa meskipun sinyal keluaran sistem mengalami fluktuasi yang cukup besar akibat gangguan *noise*, estimasi yang dihasilkan oleh Luenberger *Observer* tetap berada dalam lintasan yang halus dan mendekati nilai sebenarnya. Hal ini menunjukkan bahwa *observer* mampu mereduksi pengaruh *noise* dan menjaga akurasi estimasi keluaran sistem. Kemampuan estimasi yang stabil ini menjadi bukti efektivitas Luenberger *Observer* dalam memantau kondisi sistem, bahkan ketika sistem berada dalam kondisi yang terganggu. Oleh karena itu, integrasi *observer* ke dalam sistem kendali tidak hanya membantu menjaga kestabilan respons, tetapi juga meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal.

4.9 Analisa Sistem Suspensi Menggunakan PID Ketika Diberikan *Noise*



Gambar 4.9 Respon Sistem Suspensi Menggunakan PID Terhadap Gangguan *Noise* 5%

Tabel 4.6 Respon Sistem Suspensi dengan Pengendali PID Terhadap Gangguan *Noise* 5%

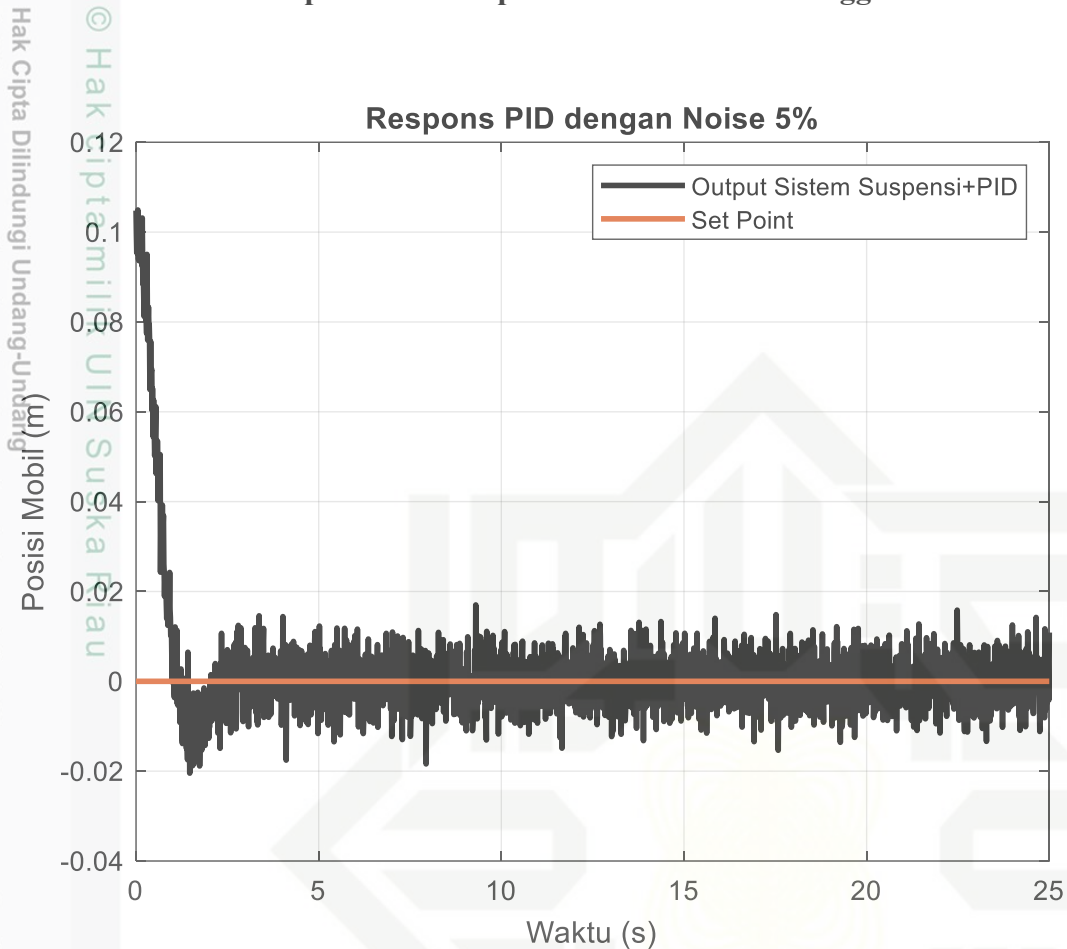
Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	10.70 %
<i>Rise Time</i>	0.7292 detik
<i>Settling Time</i>	24.9969 detik
<i>Time Delay</i>	0,4 detik
<i>RMSE</i>	12.8 %

Tabel 4.7 Perbandingan Respon Sistem PID dengan LO Terhadap *Noise* 5%

Respon Sistem	PID	PID dan LO
<i>Presentase Overshoot</i>	10.70 %	4.55 %
<i>Rise Time</i>	0.7292 detik	0.6145 detik
<i>Settling Time</i>	24.9969 detik	2.5638 detik
<i>Time Delay</i>	0.4 detik	0.29 detik
<i>RMSE</i>	12.8 %	0 %



4.10 Analisa Sistem Suspensi Terhadap Perubahan Beban Menggunakan PID



Gambar 4.10 Respon Sistem Suspensi Massa Mobil 600 kg Menggunakan PID Noise 5%

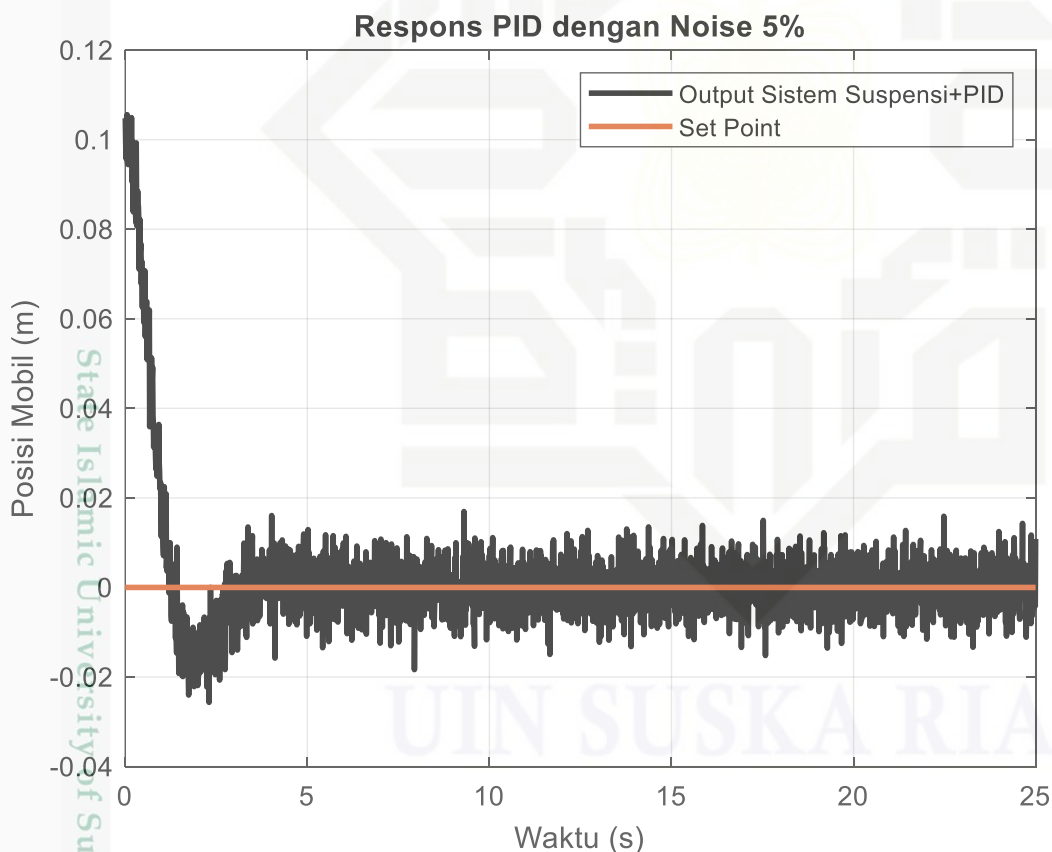
Gambar 4.10, simulasi sistem suspensi dengan menggunakan pengendali PID dilakukan dengan kondisi perubahan beban, yakni peningkatan massa mobil menjadi 600 kg. Berdasarkan hasil grafik respon sistem, diketahui bahwa sistem masih mampu mengikuti referensi (*set point*), namun menunjukkan performa yang menurun akibat peningkatan beban. Waktu naik (*rise time*) sebesar 0.7487 detik menunjukkan bahwa sistem cukup cepat dalam merespons perubahan awal dari posisi mobil. Namun demikian, waktu stabil (*settling time*) tercatat sebesar 24,9988 detik, yang berarti sistem memerlukan waktu hampir 25 detik untuk mencapai kestabilan dalam kisaran toleransi tertentu. Hal ini mengindikasikan adanya penurunan efisiensi redaman karena massa yang lebih besar membutuhkan energi lebih untuk meredam osilasi. Selain itu, sistem menunjukkan nilai *overshoot* sebesar 35,11%, yaitu deviasi maksimum terhadap nilai referensi sebelum akhirnya menstabil. Nilai *overshoot* yang tinggi ini menunjukkan bahwa sistem menghasilkan respons awal yang



berlebih sebelum kembali ke nilai target, yang dapat berpotensi menurunkan kenyamanan penumpang. Terlihat juga dari grafik bahwa osilasi cukup tinggi dan memerlukan waktu lama untuk benar-benar teredam. Secara keseluruhan, penambahan beban pada kendaraan berdampak signifikan terhadap karakteristik respon sistem suspensi, sehingga diperlukan penyesuaian parameter PID atau penerapan metode kontrol adaptif untuk menjaga performa sistem dalam kondisi beban dinamis.

Tabel 4.8 Respon Sistem Suspensi Massa Mobil 600 kg dengan Pengendali PID *Noise* 5%

Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	35.11 %
<i>Rise Time</i>	0.7487 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik
<i>Time Delay</i>	0,547 detik
<i>RMSE</i>	14.1 %

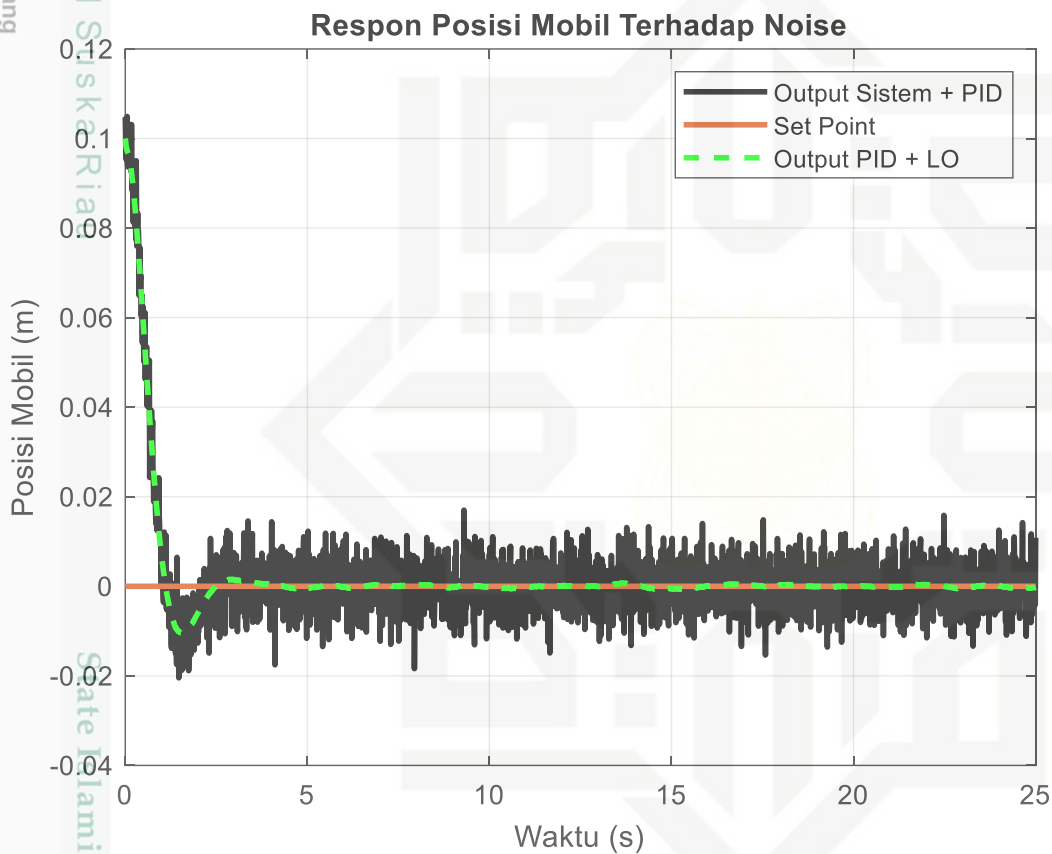


Gambar 4.11 Respon Sistem Suspensi Massa Mobil 800 kg Menggunakan PID *Noise* 5%

Tabel 4.9 Respon Sistem Suspensi Massa Mobil 800 kg dengan Pengendali PID Noise 5%

Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	40.93 %
<i>Rise Time</i>	0.8649 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik
<i>Time Delay</i>	0,664 detik
<i>RMSE</i>	15.3 %

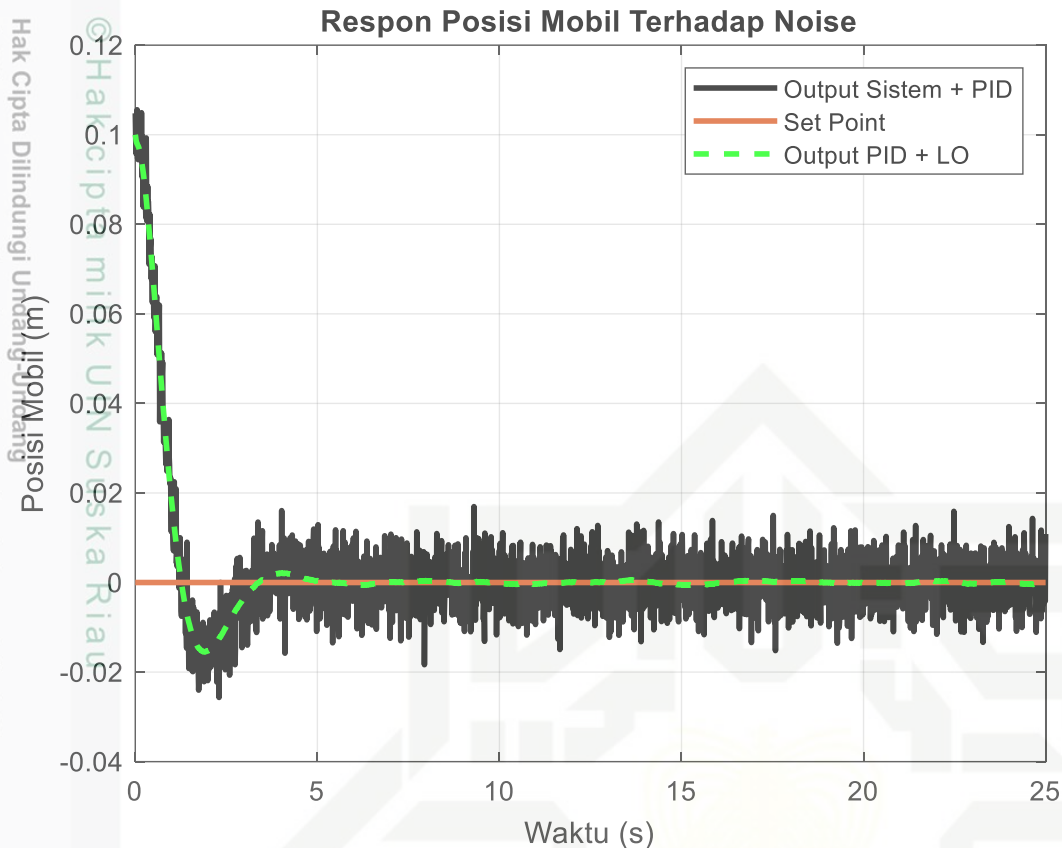
4.11 Analisa Sistem Suspensi Terhadap Perubahan Beban Menggunakan LO dan PID



Gambar 4.12 Hasil Keluaran Kombinasi PID & LO dengan Perubahan Massa 600 kg

Tabel 4.10 Perbandingan Respon Sistem PID dan LO dengan Perubahan Massa 600 kg

Respon Sistem	PID	PID dan LO
<i>Presentase Overshoot</i>	35.11 %	10.24 %
<i>Rise Time</i>	0.7487 detik	0.5941 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik	2.2602 detik
<i>Time Delay</i>	0,547 detik	0.32 detik
<i>RMSE</i>	14.1 %	0 %



Gambar 4.13 Hasil Keluaran Kombinasi PID & LO dengan Perubahan Massa 800 kg

Tabel 4.11 Perbandingan Respon Sistem PID dan LO dengan Perubahan Massa 800 kg

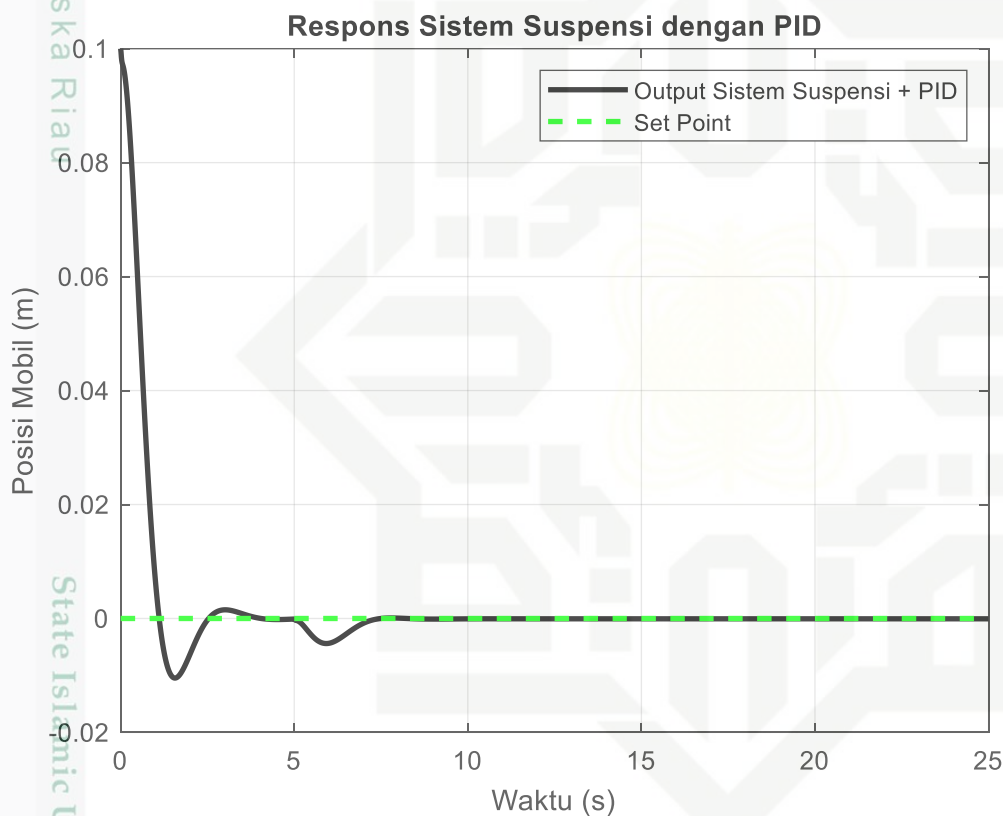
Respon Sistem	PID	PID dan LO
<i>Presentase Overshoot</i>	40.93 %	15.22 %
<i>Rise Time</i>	0.8649 detik	0.7868 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik	4.3171 detik
<i>Time Delay</i>	0,664 detik	0.47 detik
<i>RMSE</i>	15.3 %	0 %

4.12 Analisa Sistem Suspensi Pada Jalan Berlubang dengan Kedalaman 10 cm

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis respons sistem suspensi mobil saat mengalami gangguan jalan berupa lubang dengan kedalaman 10 cm. Simulasi dimulai dari kondisi awal berupa simpangan vertikal sebesar 0,1 meter pada bodi kendaraan, yang merepresentasikan ketidakseimbangan awal akibat gangguan sebelumnya atau kondisi jalan yang tidak rata. Gangguan lubang tersebut dimodelkan dalam lingkungan *Simulink* menggunakan blok *Step* yang diaktifkan pada waktu $t = 5$ detik, dan dihubungkan dengan blok *Gain* bernilai $-0,1$ yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7, yang



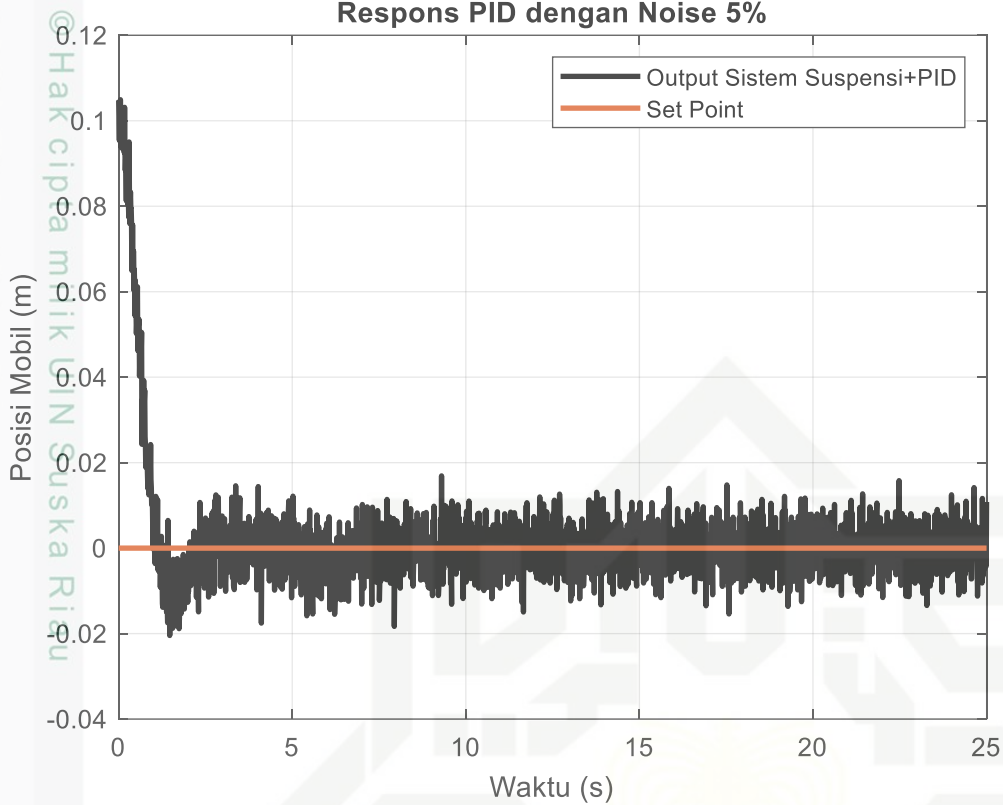
merepresentasikan kedalaman lubang sebesar 10 cm. Dengan konfigurasi ini, sistem menerima gangguan negatif secara tiba-tiba pada detik ke-5, yang secara fisik menggambarkan kondisi roda kendaraan masuk ke dalam lubang di permukaan jalan. Sistem dikendalikan oleh pengendali PID dan LO yang telah melalui proses penalaan untuk menghasilkan respons yang adaptif dan stabil terhadap perubahan kondisi sistem. Parameter sistem yang digunakan merujuk pada Tabel 3.6, yaitu massa bodi mobil sebesar 600 kg, massa roda 15 kg, konstanta pegas 2500 N/m, konstanta elastisitas ban 3250 N/m, konstanta redaman 1250 N/m, serta penambahan gangguan noise sebesar 5% untuk mensimulasikan ketidakpastian lingkungan secara lebih realistis.



Gambar 4.14 Respon Terhadap Jalan Berlubang Menggunakan PID Tanpa Noise

Tabel 4.12 Respon Sistem Suspensi Terhadap Jalan Berlubang Tanpa Noise

Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	10.39 %
<i>Rise Time</i>	0.7488 detik
<i>Settling Time</i>	6.6499 detik
<i>Time Delay</i>	0,567 detik
<i>RMSE</i>	13.1 %



Gambar 4.15 Respon Terhadap Jalan Berlubang Menggunakan PID *Noise 5%*

Tabel 4.13 Respon Sistem Suspensi Terhadap Jalan Berlubang *Noise 5%*

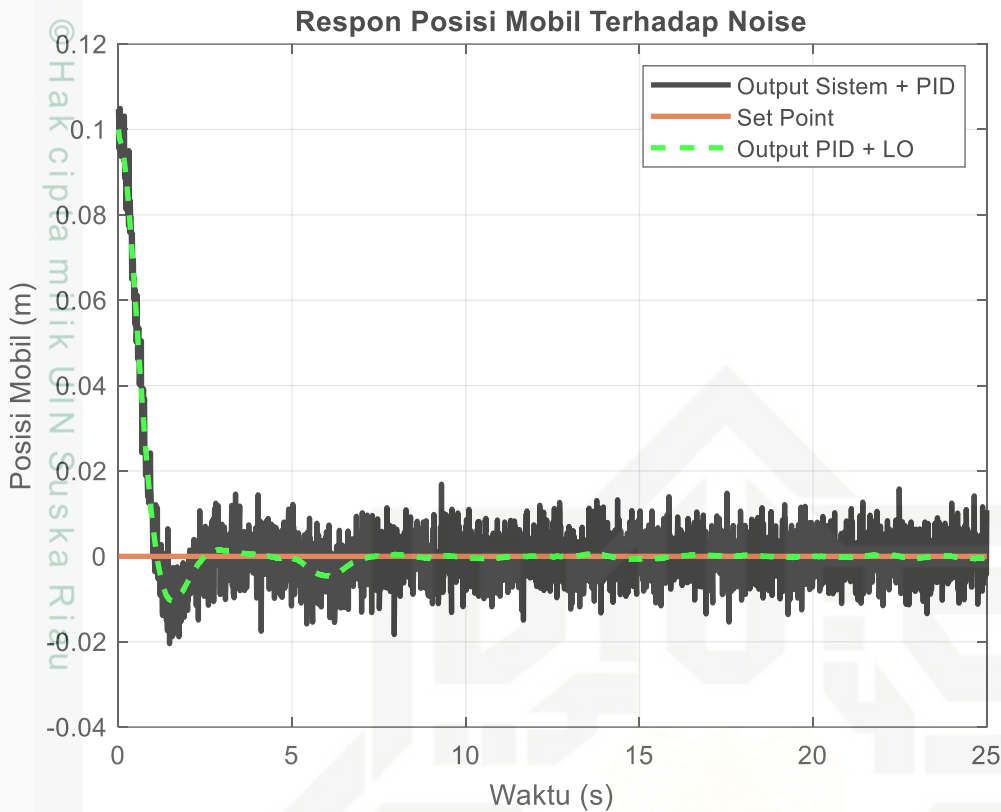
Respon Sistem	PID
<i>Presentase Overshoot</i>	35.02 %
<i>Rise Time</i>	0.5942 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik
<i>Time Delay</i>	0,546 detik
<i>RMSE</i>	14.1 %

dan menyebutkan sumber:

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 4.16 Hasil Keluaran Kombinasi PID & LO *Noise* Terhadap Jalan Berlubang

Tabel 4.14 Perbandingan Respon Sistem PID dan LO Terhadap Jalan Berlubang

Respon Sistem	PID	PID dan LO
<i>Presentase Overshoot</i>	35.02 %	10.18 %
<i>Rise Time</i>	0.5942 detik	0.7493 detik
<i>Settling Time</i>	24.9988 detik	4.5929 detik
<i>Time Delay</i>	0,546 detik	0.36 detik
<i>RMSE</i>	14.1 %	0 %

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem suspensi mobil saat menghadapi gangguan berupa jalan berlubang, dengan atau tanpa adanya *noise*. Berdasarkan hasil simulasi yang dirangkum dalam Tabel 4.12, sistem yang hanya menggunakan pengendali PID tanpa gangguan *noise* menunjukkan performa yang cukup stabil. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *overshoot* sebesar 10,39% dan waktu tunak (*settling time*) yang relatif singkat, yaitu 6,6499 detik. Waktu naik (*rise time*) sebesar 0,7488 detik dan *time delay* sebesar 0,567 detik mengindikasikan bahwa sistem mampu merespons gangguan dengan cepat dan efisien. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 13,1% masih dalam batas yang dapat diterima untuk menunjukkan akurasi sistem dalam mencapai set point.



Namun, pada saat *noise* sebesar 5% ditambahkan ke dalam sistem (Tabel 4.13), terjadi penurunan performa yang signifikan. Nilai *overshoot* meningkat tajam menjadi 35,02%, menunjukkan bahwa sistem menjadi jauh lebih sensitif terhadap gangguan acak. Selain itu, *settling time* memburuk secara drastis menjadi 24,9988 detik, menandakan waktu pemulihan sistem yang sangat lambat. Meskipun *rise time* sedikit lebih cepat, yakni 0,5942 detik, hal ini tidak dapat mengimbangi dampak negatif dari peningkatan *RMSE* yang mencapai 14,1%. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendali PID konvensional kurang optimal saat dihadapkan dengan kondisi lingkungan yang tidak ideal (*noise*).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dilakukan pengujian lanjutan dengan menambahkan Luenberger *Observer* (LO) ke dalam sistem kontrol (Tabel 4.14). Hasilnya menunjukkan peningkatan performa yang signifikan. Nilai *overshoot* berhasil ditekan hingga 10,18%, dan *settling time* dipercepat menjadi hanya 4,5929 detik. *Time delay* juga menurun menjadi 0,36 detik. Yang paling mencolok adalah nilai *RMSE* yang turun menjadi 0%, menunjukkan bahwa sistem dengan kombinasi PID dan LO mampu mengikuti set point dengan akurasi yang sangat tinggi, bahkan dalam kondisi dengan *noise* sebesar 5%. Meskipun terdapat sedikit peningkatan pada *rise time* menjadi 0,7493 detik, hal ini merupakan kompromi yang wajar mengingat peningkatan besar dalam stabilitas dan ketahanan sistem terhadap gangguan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa meskipun pengendali PID mampu memberikan kinerja yang baik dalam kondisi ideal, penambahan Luenberger *Observer* terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem secara signifikan, terutama dalam lingkungan yang mengandung ketidakpastian seperti *noise*. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan PID yang dikombinasikan dengan teknik estimasi keadaan seperti LO merupakan pendekatan yang efektif dalam perancangan sistem suspensi aktif.