

BAB IV

ANALISA HASIL

Pada bab sebelumnya telah dijelaskan pemodelan matematis sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR), proses perancangan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR), serta langkah-langkah simulasi yang digunakan. Pada bab ini disajikan hasil simulasi dan analisis performa sistem, baik pada kondisi tanpa pengendali maupun saat pengendali LQR diterapkan dalam konfigurasi *close loop*. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink R2024a dengan tegangan terminal 220 V sebagai nilai referensi sistem. Tujuan analisis ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan LQR dalam meningkatkan kestabilan tegangan, menurunkan *overshoot*, mempercepat waktu pemulihan, dan meminimalkan *error steady-state*, termasuk pada kondisi ketika sistem dikenai gangguan. Pengujian yang dilakukan meliputi:

1. Pengujian dan Analisa Hasil Sistem AVR tanpa Pengendali.
2. Pengujian dan Analisa hasil sistem AVR dengan pengendali LQR
3. Pengujian dan Analisa hasil sistem AVR LQR dengan gangguan (*Disturbance*).
4. Pengujian dan Analisa hasil sistem AVR LQR dengan gangguan (*Noise*).

4.1. Pengujian dan Analisa Hasil Sistem AVR tanpa Pengendali

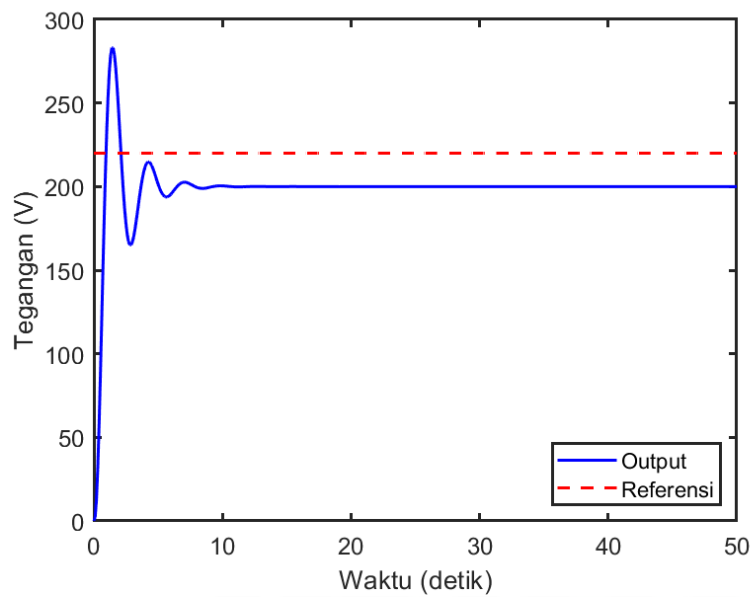
Pada tahap awal pengujian, dilakukan simulasi sistem AVR tanpa penerapan pengendali untuk mengamati karakteristik dinamik alami sistem sebelum diberikan aksi kendali. Pengujian ini bertujuan sebagai acuan dasar dalam mengevaluasi peningkatan performa sistem setelah pengendali diterapkan.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink dengan waktu simulasi sebesar 50 detik, waktu sampling 0,1 detik, dan kondisi awal sistem sebesar nol. Model simulasi disusun menggunakan blok *Simulink* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2, dengan struktur pemodelan mengacu pada representasi ruang keadaan (*state space*) yang diturunkan dari persamaan matematis pada Persamaan (3.6).

Pada pengujian ini, sistem diberikan masukan berupa tegangan referensi sebesar 220 V untuk mengamati respon tegangan terminal generator ketika sistem bekerja secara alami tanpa pengendali. Hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai pembanding dasar terhadap performa sistem ketika pengendali LQR diterapkan pada pengujian berikutnya.

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 4 -1 Hasil simulasi AVR tanpa pengendali

Gambar 4-1, respon sistem AVR tanpa pengendali menunjukkan adanya lonjakan awal tegangan yang cukup tinggi sebelum perlahan turun menuju kondisi tunak. Kurva keluaran sistem terlihat tidak mampu mengikuti nilai referensi 220 V yang ditunjukkan oleh garis putus-putus merah. Perbedaan antara tegangan *output* dan tegangan acuan masih tampak jelas baik pada fase transien maupun saat sistem memasuki kondisi *steady-state*, sehingga sistem belum mampu menjaga kestabilan tegangan secara mandiri.

Tabel 4-1 Hasil pengujian AVR tanpa pengendali

NO	Peformansi	Nilai
1	Persentase <i>Overshoot</i>	41.5281 %
2	T_r (<i>Rise Time</i>)	0.5598 s
3	T_s (<i>Settling Time</i>)	6.0524 s
4	T_d (<i>Time Delay</i>)	0.6000 s
5	<i>ESS (Error Steady State)</i>	20 V

Tabel 4-1 memperkuat hasil pengamatan grafik dengan nilai parameter uji yang diperoleh. Persentase *overshoot* mencapai 41.5281%, menunjukkan bahwa tegangan

melampaui nilai nominal dalam jumlah yang signifikan. *Rise time* sebesar 0.5598 detik mengindikasikan sistem merespons cepat, namun respons ini tidak terkendali sehingga menghasilkan *overshoot* besar. *Settling time* selama 6.0524 detik menunjukkan sistem membutuhkan waktu cukup lama untuk mencapai kestabilan. Nilai *Error Steady-State* (ESS) masih mencapai 20 V, menggambarkan adanya deviasi tetap sebesar 9.09% dari tegangan referensi yang tidak dapat diterima dalam standar regulasi tegangan.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem AVR tanpa pengendali belum mampu memberikan performa regulasi tegangan yang baik. *Overshoot* yang besar, waktu pemantapan yang lama, dan *error steady-state* yang tinggi mencerminkan keterbatasan mendasar sistem tanpa umpan balik. Oleh karena itu, diperlukan penerapan pengendali dalam konfigurasi *closed-loop* untuk meningkatkan kualitas regulasi tegangan, mengurangi *error*, serta meningkatkan stabilitas sistem agar sesuai dengan standar operasi sistem tenaga listrik.

4.2. Pengujian dan Analisa Hasil AVR dengan Pengendali LQR

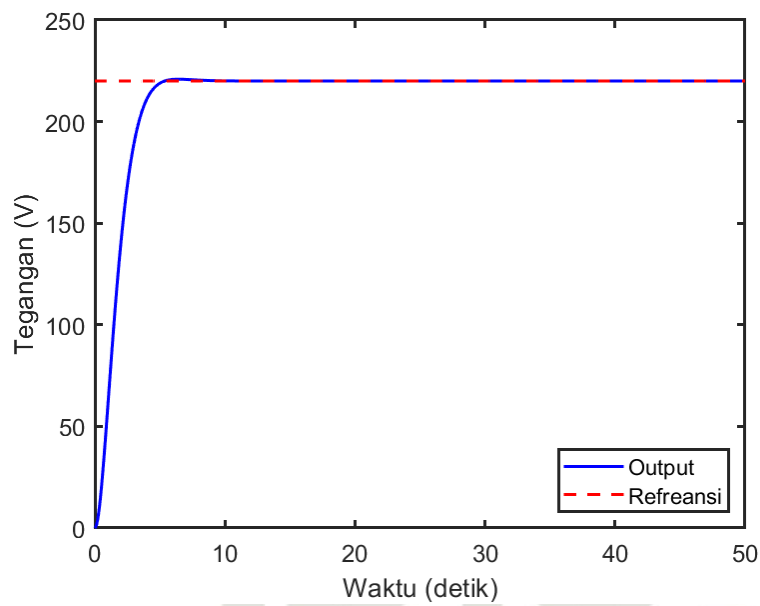
Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja sistem AVR dalam kondisi *closed-loop* dengan menerapkan pengendali LQR. Implementasi pengendali dilakukan menggunakan model simulasi pada blok *Simulink* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3, dengan struktur pengendali yang dibangun berdasarkan model matematis dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) sesuai Persamaan (3.6).

Parameter pembobot LQR, yaitu matriks Q dan R, ditetapkan berdasarkan nilai yang telah dirancang dan ditampilkan pada Tabel 3.3. Pada skenario pengujian ini, sistem diberikan masukan berupa *setpoint* tegangan terminal sebesar 220 V untuk mengevaluasi kemampuan pengendali LQR dalam mengatur keluaran sistem agar mengikuti nilai referensi secara stabil dan terkendali.

Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi peningkatan performa sistem setelah penerapan pengendali LQR, baik dari aspek kecepatan respon maupun kestabilan tegangan, sebelum dilakukan analisis lanjutan pada kondisi gangguan (*disturbance*) dan *noise*.

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 4-2 Hasil simulasi AVR dengan pengendali LQR

Berdasarkan Gambar 4-2, respon sistem AVR dengan pengendali LQR menunjukkan peningkatan performa yang sangat signifikan dibandingkan konfigurasi AVR tanpa pengendali. Kurva *output* (biru) mampu mengikuti sinyal referensi sebesar 220V (garis merah putus-putus) dengan cepat dan stabil tanpa osilasi yang berarti. Hal ini menandakan bahwa penerapan kendali berbasis *state-space* mampu memperbaiki kestabilan sistem dan meningkatkan akurasi regulasi tegangan.

Pengujian dilakukan menggunakan matriks pembobot Q dan R yang ditentukan melalui proses tuning *heuristik*. Matriks Q diberikan sebagai matriks diagonal dengan bobot yang seimbang untuk masing-masing *state*, sementara nilai R ditetapkan melalui beberapa percobaan untuk memperoleh keseimbangan antara effort kendali dan kualitas respon. Pemilihan parameter ini berpengaruh langsung terhadap karakteristik sistem seperti *overshoot*, waktu transien, dan *error steady-state*.

Tabel 4-2 Hasil pengujian AVR dengan pengendali LQR

NO	Peformansi	Nilai
1	Persentase <i>Overshoot</i>	0.3956 %
2	T_r (<i>Rise Time</i>)	2.7708 s

3	T_s (Settling Time)	4.4243 s
4	T_d (Time Delay)	1.6000 s
5	ESS (Error Steady State)	0.0109 V

Tabel 4-2 memperlihatkan parameter performa sistem setelah penerapan pengendali LQR. Persentase *overshoot* menurun drastis menjadi 0.3956%, jauh lebih kecil dibandingkan AVR tayang mencapai 41.5281%. *Error steady-state* juga turun sangat signifikan menjadi 0.0109V, menunjukkan kemampuan tracking yang hampir sempurna terhadap nilai referensi. *Settling time* tercatat sebesar 4.4243 detik, lebih cepat dibandingkan konfigurasi tanpa pengendali, sementara *rise time* sedikit meningkat sebagai konsekuensi dari minimisasi *overshoot*—*trade-off* yang masih dapat diterima dalam sistem tenaga listrik.

Secara keseluruhan, implementasi pengendali LQR terbukti mampu mengatasi permasalahan utama sistem AVR *open loop*, yaitu tingginya *overshoot*, lamanya waktu mencapai kestabilan, dan besarnya *error steady-state*. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan kendali optimal dengan tuning *heuristik* efektif dalam meningkatkan kualitas regulasi tegangan dan memenuhi standar kestabilan yang dipersyaratkan pada sistem pembangkit listrik.

4.3. Pengujian dan Analisa AVR LQR terhadap Gangguan (*Disturbance*)

Subbab ini membahas pengujian sistem AVR dengan pengendali LQR untuk menganalisis kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan terminal ketika mengalami gangguan (*disturbance*) selama proses operasi. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan dan karakteristik dinamis sistem AVR dalam kondisi operasi yang tidak ideal.

Untuk keperluan analisis, respon sistem dibagi ke dalam tiga zona pengamatan, yaitu Zona I, Zona II, dan Zona III, sebagaimana ditunjukkan pada grafik hasil simulasi. Pembagian zona ini dimaksudkan untuk mempermudah evaluasi performa sistem pada kondisi operasi yang berbeda serta merepresentasikan fenomena fisik yang umum terjadi pada sistem AVR, seperti perubahan *setpoint*, lonjakan beban, serta gangguan pada sinyal pengukuran dan aktuator.

Pada Zona I, sistem beroperasi pada kondisi awal tanpa gangguan, sehingga respon yang diamati merupakan respon transien awal menuju kondisi tunak. Zona II

mererepresentasikan kondisi ketika sistem mengalami perubahan *setpoint* dan gangguan terstruktur pada waktu tertentu, yang mencerminkan perubahan kondisi operasi secara tiba-tiba. Selanjutnya, Zona III menunjukkan respon sistem setelah gangguan dilepas, di mana sistem diuji pada fase pemulihan dan kemampuan mempertahankan kondisi *steady-state*.

Melalui pembagian tiga Zona tersebut, pengujian ini memberikan gambaran yang lebih jelas dan komprehensif mengenai tingkat ketahanan (*robustness*) pengendali LQR dalam mempertahankan stabilitas dan kualitas regulasi tegangan. Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan mengamati parameter respon utama, meliputi *overshoot*, waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), *time delay*, serta *steady-state error* pada masing-masing Zona pengujian.

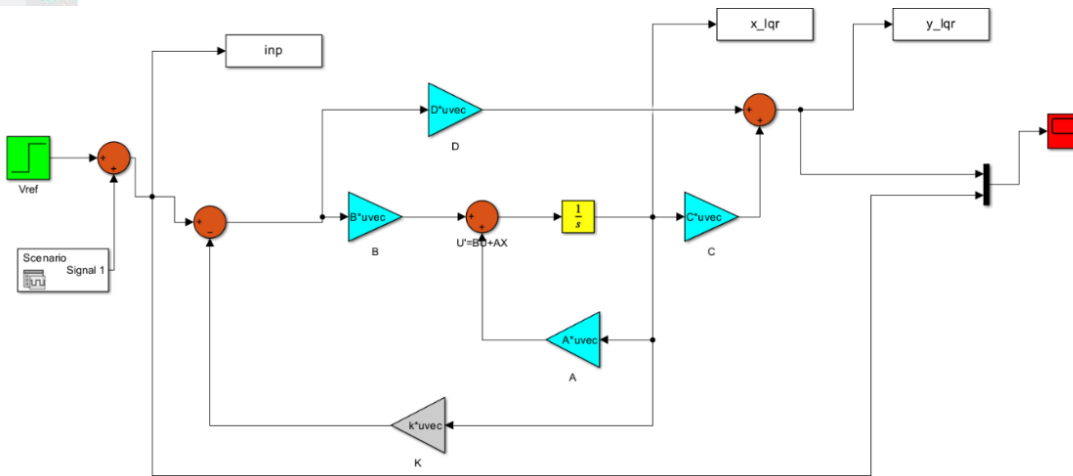
4.3.1 Pengujian dan Analisa AVR LQR dengan (*Disturbance*) input

Analisis performa sistem terhadap *disturbance* pada *input* diawali dengan penyusunan model simulasi pada perangkat lunak *Simulink* yang mengacu pada struktur *state-space* sistem AVR dengan penambahan blok *step disturbance* pada jalur referensi utama. Secara fisik, injeksi gangguan di titik ini merepresentasikan kondisi riil berupa fluktuasi beban sistem yang berdampak pada stabilitas tegangan, perubahan *setpoint* operator secara mendadak, serta variasi tegangan referensi akibat *noise* atau ketidakstabilan sistem pengukuran. Tujuan utama penempatan gangguan pada jalur *input* adalah untuk mensimulasikan dinamika perubahan tegangan acuan yang bersifat mendadak, sebagaimana umumnya terjadi pada operasi generator sinkron di lapangan. Rancangan detail blok simulasi yang mengintegrasikan pengendali LQR dengan gangguan input ini secara menyeluruh ditampilkan pada Gambar 4-3.

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

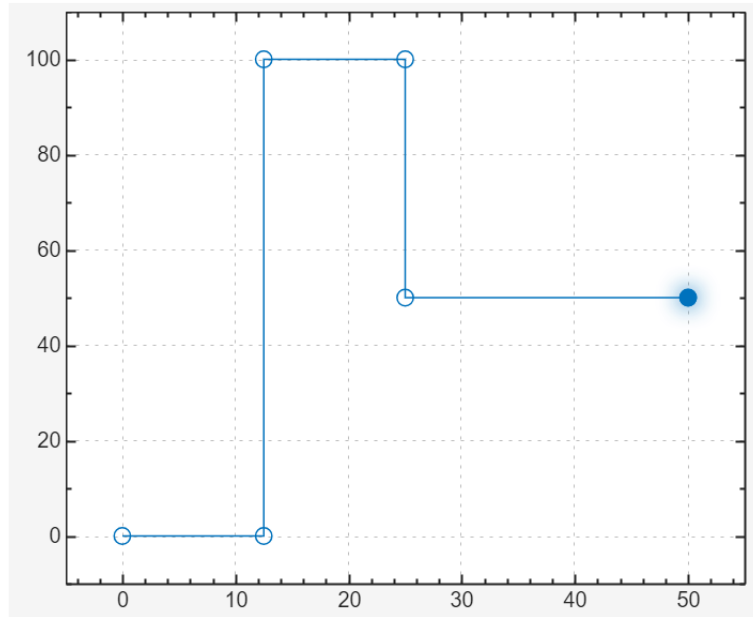


Gambar 4-3 Blok Simulink AVR LQR dengan gangguan *disturbance* pada *input*

Tahap selanjutnya setelah penyusunan blok simulasi adalah menentukan karakteristik sinyal gangguan (*disturbance*) yang akan diujikan. Pada penelitian ini, gangguan direpresentasikan melalui sinyal step yang bervariasi pada tiga titik waktu strategis, yaitu detik ke-12,5, detik ke-25, hingga akhir simulasi pada detik ke-50. Pemberian variasi gangguan secara bertahap ini bertujuan untuk mengevaluasi respons dinamis pengendali LQR dalam menghadapi perubahan referensi yang terjadi berulang kali selama siklus operasi sistem. Visualisasi dari bentuk sinyal gangguan yang diterapkan pada jalur *input* tersebut secara mendetail dapat dilihat pada Gambar 4-4.

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.

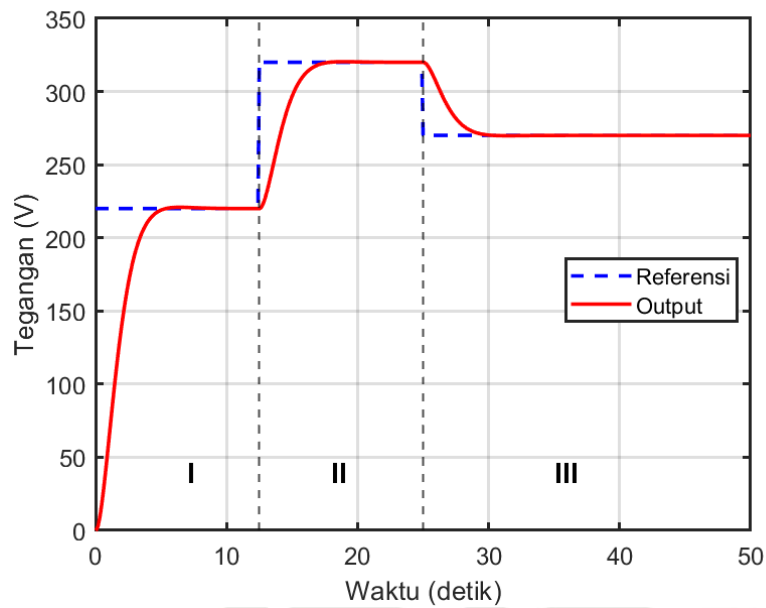


Gambar 4-4 Bentuk Sinyal Gangguan *Disturbance* pada *input*

Setelah model simulasi dan sinyal gangguan ditetapkan, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi respons sistem AVR terhadap intervensi pada jalur *input*. Karakteristik respons yang dihasilkan mencerminkan kapabilitas pengendali LQR dalam memitigasi efek perubahan mendadak pada nilai referensi guna mempertahankan stabilitas tegangan keluaran. Hasil simulasi pada Gambar 4-5 menyajikan perbandingan antara tegangan referensi yang telah diberikan gangguan terhadap profil tegangan keluaran AVR secara aktual. Data visual ini kemudian digunakan sebagai basis untuk menganalisis parameter performansi sistem secara komprehensif, mencakup aspek *overshoot*, waktu pemulihan (*recovery time*), serta deviasi keluaran pada setiap fase perubahan.

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 4-5 Hasil simulasi AVR LQR dengan gangguan *step disturbance* di sinyal *input*

Berdasarkan hasil pada Gambar 4-5, pengendali AVR berbasis LQR terbukti mampu mempertahankan tegangan terminal agar tetap presisi mengikuti perubahan nilai referensi di setiap zona pengujian, meskipun sistem diberikan gangguan berupa *step disturbance*. Pada Zona I, sistem menunjukkan karakteristik transien yang stabil dengan kenaikan tegangan menuju *setpoint* pertama tanpa osilasi berlebihan dan *overshoot* yang sangat minimal. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter kontrol LQR telah dikonfigurasi dengan baik untuk menjaga kestabilan pada fase awal operasi.

Memasuki Zona II, saat terjadi peningkatan *setpoint* yang signifikan, sistem memberikan respon cepat yang diikuti dengan *overshoot* terbatas. Walaupun muncul deviasi transien sesaat terhadap nilai referensi, osilasi tersebut dapat diredam secara efektif sehingga sistem kembali mencapai kondisi stabil dalam waktu singkat. Fenomena ini menunjukkan ketahanan (*robustness*) pengendali LQR dalam mengelola dinamika sistem di tengah perubahan kondisi operasi yang mendadak.

Pada Zona III, ketika nilai *setpoint* diturunkan, profil *output* memperlihatkan adanya *undershoot* transien sebelum akhirnya mencapai nilai *steady-state* yang baru. Munculnya *time delay* dan durasi penyesuaian pada fase ini mengindikasikan adanya keterbatasan kecepatan koreksi *error* oleh pengendali LQR saat menghadapi penurunan beban referensi yang drastis. Meski demikian, sistem tetap mampu mempertahankan stabilitas tanpa adanya

osilasi berkelanjutan, menunjukkan performansi regulasi tegangan yang secara keseluruhan tetap handal

Tabel 4-3 Hasil pengujian AVR LQR dengan gangguan *disturbance* pada *input*

NO	Zona	Peformansi				
		Persentase <i>Overshoot</i>	T_r	T_s	T_d	<i>ESS</i>
1	Zona I	0.391 %	2.7710 s	4.4260 s	1.6000 s	4.8430 V
2	Zona II	0.119 %	2.1490 s	3.6670 s	1.6000 s	1.9788 V
3	Zona III	-	0 s	3.2350 s	0s	0.0113 V

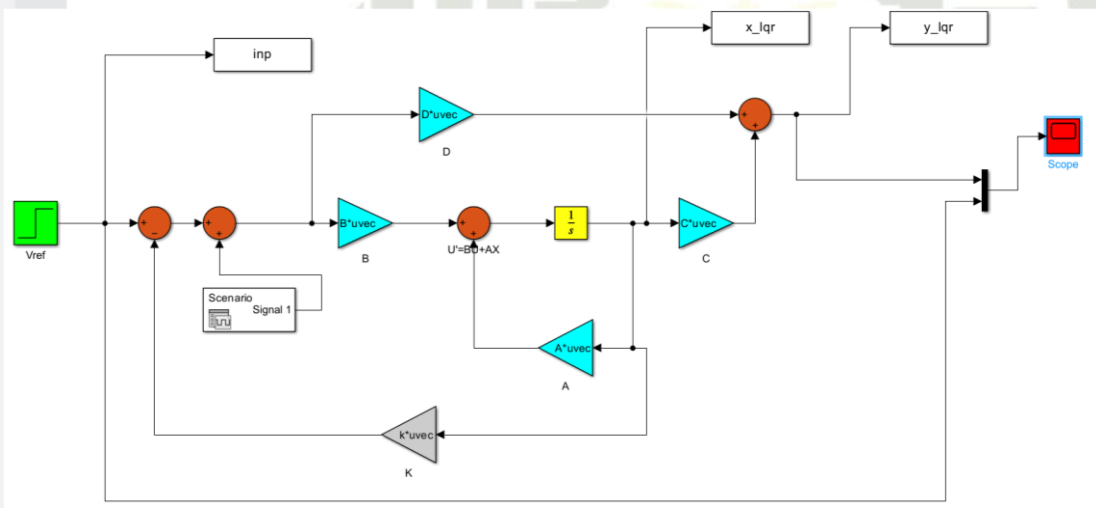
Berdasarkan data numerik pada Tabel 4-3, pengendali LQR menunjukkan karakteristik respons yang konsisten di setiap zona operasi. Pada Zona I, sistem mencatat persentase *overshoot* yang sangat rendah sebesar 0,391% dengan *rise time* 2,771 s dan *settling time* 4,426 s. Meskipun terdapat *steady-state error* ESS sebesar 4,843 V, sistem mampu mencapai kondisi stabil dengan deviasi akhir yang masih berada dalam rentang toleransi operasional.

Peningkatan performansi terlihat pada Zona II, di mana *overshoot* menurun menjadi 0,119% disertai dengan *rise time* (2,149 s) dan *settling time* (3,667 s) yang lebih responsif. Penurunan nilai ESS menjadi 1,9788 V mengindikasikan bahwa pengendali LQR bekerja lebih efektif dalam mengoreksi kesalahan pada titik operasi ini.

Sementara itu, pada Zona III, parameter *overshoot* ditiadakan karena karakteristik respons pada fase penurunan setpoint ini hanya memicu fenomena *undershoot* transien. Sistem menunjukkan efisiensi pemulihan yang tinggi dengan *settling time* tercepat yaitu 3,235 s dan nilai ESS yang sangat kecil (0,0113 V). Secara keseluruhan, penyetaraan performansi ini membuktikan bahwa pengendali LQR memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menjaga stabilitas dan akurasi tegangan AVR tanpa adanya lonjakan atau osilasi yang membahayakan sistem pada saat terjadi transien beban turun.

4.3.2 Pengujian dan Analisa AVR LQR dengan (*Disturbance*) Sinyal kendali

Pengujian pada skenario ini dilakukan dengan memberikan intervensi berupa gangguan (*disturbance*) pada jalur sinyal kendali u yang secara teknis berfungsi sebagai sinyal masukan bagi aktuator sistem eksitasi. Secara fisik, gangguan pada sinyal kendali ini merepresentasikan kondisi anomali ketika aktuator atau rangkaian penguat eksitasi mengalami degradasi performa, seperti keterbatasan respons aktuator, fenomena saturasi penguat, fluktuasi tegangan suplai, hingga interferensi elektromagnetik. Kondisi-kondisi tersebut menyebabkan sinyal kendali aktual yang diterima sistem berbeda dari nilai kalkulasi ideal oleh pengendali LQR. Untuk mensimulasikan fenomena ini, model Simulink disusun dengan mengintegrasikan blok *disturbance* pada jalur sinyal kendali sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4-6, guna mengamati dampak gangguan terhadap kinerja serta kestabilan sistem AVR secara langsung.

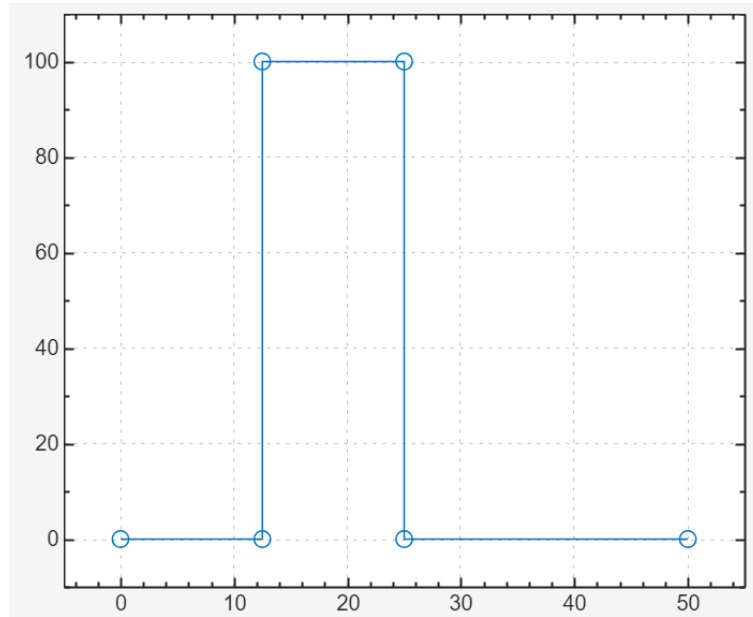


Gambar 4-6 Blok *Simulink* AVR LQR dengan gangguan *Disturbance* pada sinyal kendali

Skenario gangguan direalisasikan menggunakan sinyal *disturbance* bertipe *step* yang mengalami perubahan status pada tiga titik waktu kunci, yakni detik ke-12,5, detik ke-25, hingga batas akhir simulasi pada detik ke-50. Variasi perubahan ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional di mana sinyal kendali mengalami pengaruh gangguan periodik secara mendadak selama sistem bekerja. Karakteristik sinyal *disturbance* tersebut disajikan pada Gambar 4-7 sebagai parameter acuan gangguan yang diinjeksikan langsung ke dalam sistem melalui jalur kendali u .

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.

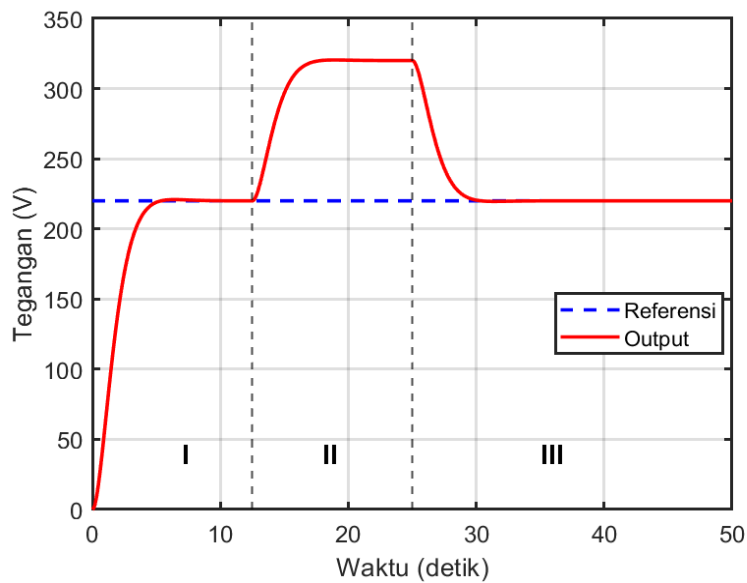


Gambar 4-7 Bentuk Sinyal Gangguan *Disturbance* pada sinyal Kendali

Setelah konfigurasi blok *Simulink* dan karakteristik sinyal gangguan ditetapkan, proses simulasi dijalankan untuk mengevaluasi respons sistem AVR terhadap *disturbance* pada sinyal kendali. Pengujian ini secara spesifik bertujuan untuk menilai kapabilitas pengendali LQR dalam mempertahankan stabilitas tegangan terminal ketika jalur aksi kendali mengalami fluktuasi mendadak akibat gangguan eksternal. Dinamika respons sistem yang dihasilkan dari pengujian ini disajikan secara mendetail pada Gambar 4-8, yang memperlihatkan perilaku tegangan pada setiap fase gangguan.

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 4-8 Hasil simulasi AVR LQR dengan gangguan *disturbance*

Berdasarkan visualisasi pada Gambar 4-8, dapat diamati bahwa gangguan yang diberikan pada jalur sinyal kendali u memberikan pengaruh yang signifikan terhadap profil tegangan keluaran sistem AVR. Pada Zona I, sistem menunjukkan respons awal yang stabil menuju nilai referensi 220 V, meskipun terdapat dinamika transien pada fase *startup* sebelum mencapai kondisi tunak. Karakteristik ini menandakan bahwa pengendali LQR mampu mengarahkan sistem menuju titik kerja yang ditetapkan pada kondisi operasi awal secara efektif.

Memasuki Zona II, ketika sinyal gangguan diinjeksikan pada jalur kendali, terjadi lonjakan tegangan yang cukup besar hingga melampaui nilai referensi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa perubahan langsung pada variabel aksi pengendali berdampak signifikan terhadap tegangan eksitasi generator. Meskipun tercatat adanya *overshoot* yang tinggi akibat besarnya amplitudo gangguan, respons sistem tetap bersifat teredam (*damped*) tanpa menunjukkan adanya osilasi berkelanjutan, sehingga integritas kestabilan sistem tetap terjaga.

Pada Zona III, saat gangguan dilepaskan, respons sistem memperlihatkan penurunan tegangan yang tajam sebelum akhirnya kembali berkonvergensi menuju nilai referensi 220 V. Adanya durasi penyesuaian (*recovery time*) sebelum mencapai kondisi *steady-state* mengindikasikan keterbatasan kecepatan koreksi pengendali LQR dalam meredam gangguan statis pada jalur kendali. Namun demikian, sistem terbukti mampu melakukan

pemulihan mandiri menuju kondisi stabil tanpa mengalami kegagalan regulasi atau ketidakstabilan jangka panjang.

Tabel 4-4 Hasil pengujian AVR LQR dengan gangguan *disturbance* di sinyal kendali

NO	Zona	Peformansi				
		Persentase <i>Overshoot</i>	T_r	T_s	T_d	ESS
1	Zona I	0.391 %	2.7710 s	4.4260 s	1.6000 s	4.8430 V
2	Zona II	45.627 %	0 s	-	0.100 s	-98.0212 V
3	Zona III	-	0 s	3.936 s	0s	0.0108 V

Berdasarkan data performansi yang dirangkum pada Tabel 4-4, respons sistem AVR dengan pengendali LQR menunjukkan disparitas karakteristik yang sangat kontras di setiap zona pengujian akibat pengaruh *disturbance* pada sinyal kendali. Pada Zona I, sistem tetap mempertahankan kinerja yang optimal dengan persentase *overshoot* minimal sebesar 0,391%, *rise time* 2,771 s, serta *settling time* 4,426 s. Dengan nilai *time delay* 1,6 s dan ESS sebesar 4,843 V, sistem terbukti mampu mencapai kondisi stabil dengan deviasi akhir yang masih dalam batas toleransi operasional normal sebelum gangguan berat diinjeksikan.

Memasuki Zona II, saat gangguan diberikan secara langsung pada jalur sinyal kendali, performansi sistem mengalami degradasi drastis. Hal ini ditunjukkan oleh lonjakan *overshoot* yang sangat agresif hingga mencapai 45,627% dengan *rise time* yang terbaca 0 s, mengindikasikan lonjakan tegangan yang hampir instan akibat gangguan pada aktuator. Pada fase ini, sistem tidak mampu mencapai *settling time* dalam periode pengamatan dan menghasilkan ESS negatif yang signifikan sebesar -98,0212 V. Nilai negatif tersebut merepresentasikan penyimpangan tegangan yang sangat besar di atas nilai referensi akibat intervensi langsung gangguan pada tegangan eksitasi generator.

Pada Zona III, setelah pengaruh gangguan pada jalur kendali mereda, sistem menunjukkan kapabilitas pemulihan (*recovery*) menuju fase *steady-state*. Meskipun data tabel mencatat dampak transien yang masih tertinggal, sistem berhasil kembali stabil dengan *settling time* 3,936 s dan nilai ESS yang sangat presisi, yakni 0,0108 V. Keberhasilan sistem dalam mengembalikan tegangan menuju nilai referensi 220 V membuktikan bahwa

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.

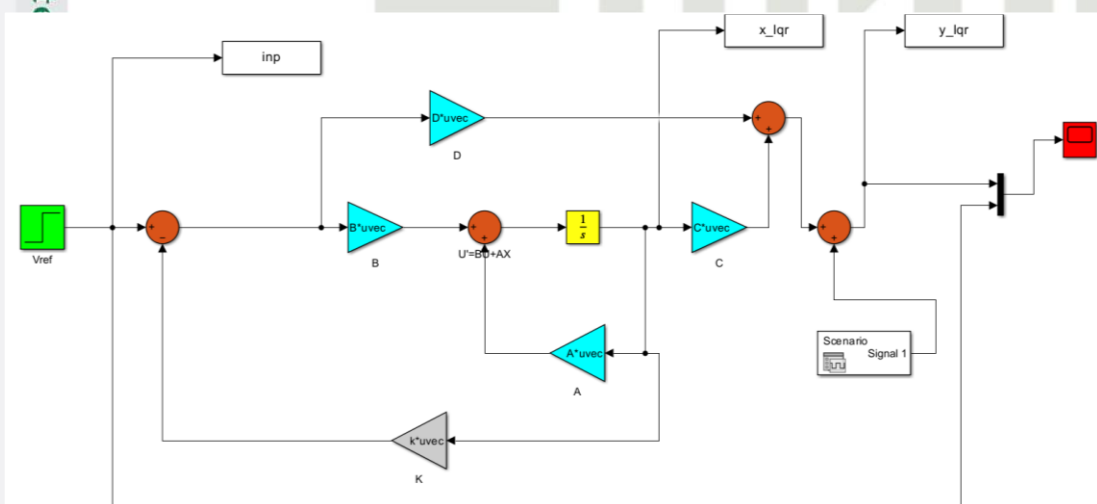
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

pengendali LQR memiliki struktur redaman yang kuat, meskipun sensitivitas transien terhadap gangguan pada aktuator masih tergolong tinggi.

Secara keseluruhan, pengujian ini menegaskan bahwa gangguan pada jalur sinyal kendali merupakan skenario paling kritis bagi performansi AVR. Walaupun LQR mampu menjamin stabilitas akhir, besarnya lonjakan pada Zona II menunjukkan perlunya strategi kendali tambahan, seperti aksi integral atau penalaan bobot matriks yang lebih ketat, untuk meningkatkan ketahanan (*robustness*) sistem terhadap anomali pada sisi aktuator eksitasi.

4.3.3 Pengujian dan Analisa AVR dengan (*Disturbance*) Output

Pengujian pada skenario ini difokuskan pada pemberian gangguan (*disturbance*) pada jalur keluaran (*output*) sistem AVR, yaitu sinyal yang merepresentasikan parameter tegangan terminal generator. Gangguan pada titik ini merepresentasikan kondisi riil di lapangan ketika sensor tegangan mengalami interferensi eksternal, penurunan akurasi pengukuran, atau dampak perubahan lingkungan yang menyebabkan pembacaan sensor tidak selaras dengan kondisi aktual sistem. Untuk mensimulasikan fenomena kegagalan atau galat pada sensor tersebut, model *Simulink* dikonfigurasi dengan menempatkan blok *disturbance* secara langsung pada jalur sinyal keluaran sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4-9. Melalui rancangan ini, pengaruh gangguan terhadap performansi serta ketangguhan pengendali LQR dalam mempertahankan regulasi tegangan dapat diamati secara komprehensif.



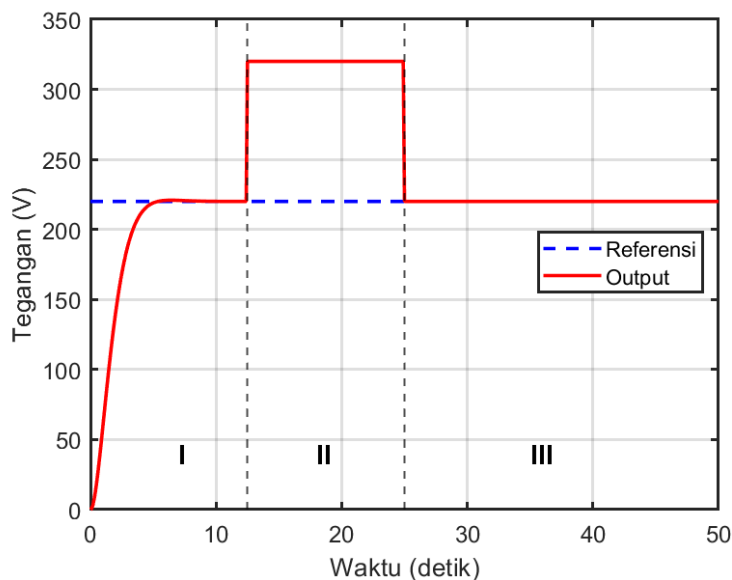
Gambar 4-9 Blok Simulink AVR LQR dengan gangguan *Disturbance Output*

Hak Cipta Ditindungi 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.

Gangguan yang diinjeksikan pada jalur keluaran direalisasikan melalui sinyal *step disturbance* yang mengalami perubahan status pada tiga titik waktu spesifik, yaitu detik ke-12,5, detik ke-25, dan detik ke-50 sebagai batas akhir periode simulasi. Konfigurasi sinyal ini bertujuan untuk mensimulasikan anomali operasional ketika sensor mengalami perubahan nilai ukur secara mendadak, seperti fenomena *sensor drift*, interferensi elektromagnetik, maupun galat pada pembacaan transduser. Bentuk gangguan tersebut diintegrasikan ke dalam sistem sebagai acuan sinyal *disturbance* yang disuntikkan langsung pada jalur keluaran (*output*) AVR.

Setelah konfigurasi blok *disturbance* dan parameter Simulink ditetapkan, proses simulasi dijalankan untuk memperoleh data respons sistem AVR terhadap gangguan pada jalur keluaran. Pengujian ini memberikan gambaran komprehensif mengenai kapabilitas pengendali LQR dalam mempertahankan regulasi tegangan ketika informasi umpan balik (*feedback*) yang diterima tidak lagi akurat akibat gangguan pada sisi sensor. Dinamika respons sistem yang dihasilkan dari pengujian gangguan *output* ini ditunjukkan secara visual pada Gambar 4-10.



Gambar 4-10 Hasil simulasi AVR LQR dengan gangguan *step disturbance Output*

Berdasarkan visualisasi pada Gambar 4-10, terlihat bahwa gangguan yang diinjeksikan pada jalur keluaran (*output*) berdampak langsung terhadap integritas mekanisme umpan balik (*feedback loop*) pada sistem AVR berbasis LQR. Pada Zona I,

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.

respons sistem menunjukkan kenaikan tegangan dari kondisi awal hingga berkonvergensi mendekati nilai referensi 220 V dengan karakteristik transien yang relatif halus. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pengendali mampu beroperasi secara efektif selama sinyal pengukuran merepresentasikan kondisi aktual sistem tanpa interferensi.

Memasuki Zona II, ketika gangguan pada sinyal keluaran aktif, nilai tegangan terukur mengalami fluktuasi signifikan yang menyebabkan pengendali LQR menginterpretasikan kondisi tersebut sebagai *error* yang besar. Sebagai konsekuensinya, aksi pengendali meningkat secara tajam sehingga tegangan keluaran melonjak jauh melampaui ambang batas referensi. Kondisi ini mencerminkan sensitivitas tinggi sistem umpan balik terhadap gangguan pengukuran, di mana deviasi pada sinyal keluaran secara instan memicu koreksi agresif dari pengendali untuk menutupi *error* semu tersebut.

Pada Zona III, segera setelah gangguan dihilangkan, sistem menunjukkan kapabilitas pemulihan untuk kembali menuju nilai referensi secara cepat tanpa disertai osilasi berkepanjangan. Tegangan keluaran kembali mencapai titik stabil di sekitar 220 V, yang membuktikan bahwa meskipun gangguan pada sensor memicu deviasi transien yang masif, struktur pengendali LQR tetap memiliki ketangguhan dalam menjaga stabilitas sistem secara menyeluruh.

Secara kolektif, hasil ini menunjukkan bahwa gangguan pada jalur keluaran secara dominan memengaruhi respons transien akibat kesalahan persepsi pada sinyal umpan balik. Namun demikian, terjaganya kestabilan *steady-state* mengonfirmasi bahwa pengendali LQR memiliki ketahanan (*robustness*) yang memadai terhadap gangguan pengukuran, meskipun tetap rentan terhadap perubahan mendadak pada sinyal keluaran.

Tabel 4-5 Hasil pengujian AVR LQR dengan gangguan *disturbance Output*

NO	Zona	Peformansi				
		Persentase <i>Overshoot</i>	T_r	T_s	T_d	ESS
1	Zona I	0.391 %	2.7710 s	4.4260 s	1.6000 s	4.8430 V
2	Zona II	45.450 %	0 s	-	0 s	-99.9890 V
3	Zona III	0 %	0 s	0 s	-	00.0109 V

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.

Berdasarkan data performansi pada Tabel 4-5, respons sistem AVR dengan pengendali LQR menunjukkan karakteristik yang kontras di setiap zona pengujian akibat adanya intervensi gangguan pada sinyal keluaran. Pada Zona I, sistem beroperasi pada kondisi normal dengan performansi yang terjaga, mencatat persentase *overshoot* minimal sebesar 0,391%, *rise time* 2,771 s, serta *settling time* 4,426 s. Nilai *time delay* 1,6 s dan ESS sebesar 4,843 V menunjukkan kapabilitas pengendali dalam mengarahkan sistem menuju titik stabil dengan akurasi yang memadai sebelum gangguan sensor disimulasikan.

Memasuki Zona II, saat gangguan pada jalur keluaran aktif, terjadi degradasi performansi transien yang sangat signifikan. Hal ini ditandai dengan melonjaknya persentase *overshoot* hingga 45,450% dengan *rise time* dan *time delay* yang mendekati 0 s. Fenomena ini mengonfirmasi bahwa galat pengukuran pada sensor langsung dipersepsikan sebagai *error* masif oleh pengendali LQR, sehingga memicu aksi kompensasi yang sangat agresif. Tidak tercapainya *settling time* serta munculnya nilai ESS negatif yang besar (-99,9890 V) menegaskan adanya penyimpangan tegangan yang persisten di atas nilai referensi selama periode gangguan berlangsung.

Pada Zona III, setelah gangguan pada jalur keluaran dihilangkan, sistem menunjukkan efisiensi pemulihan performansi yang luar biasa. Nilai *overshoot* tercatat 0% dengan *rise time* serta *settling time* yang mendekati 0 s, disertai nilai ESS yang sangat kecil sebesar 0,0109 V. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa pengendali LQR mampu mengembalikan sistem ke kondisi *steady-state* secara presisi dan instan segera setelah sinyal umpan balik kembali merepresentasikan kondisi aktual sistem.

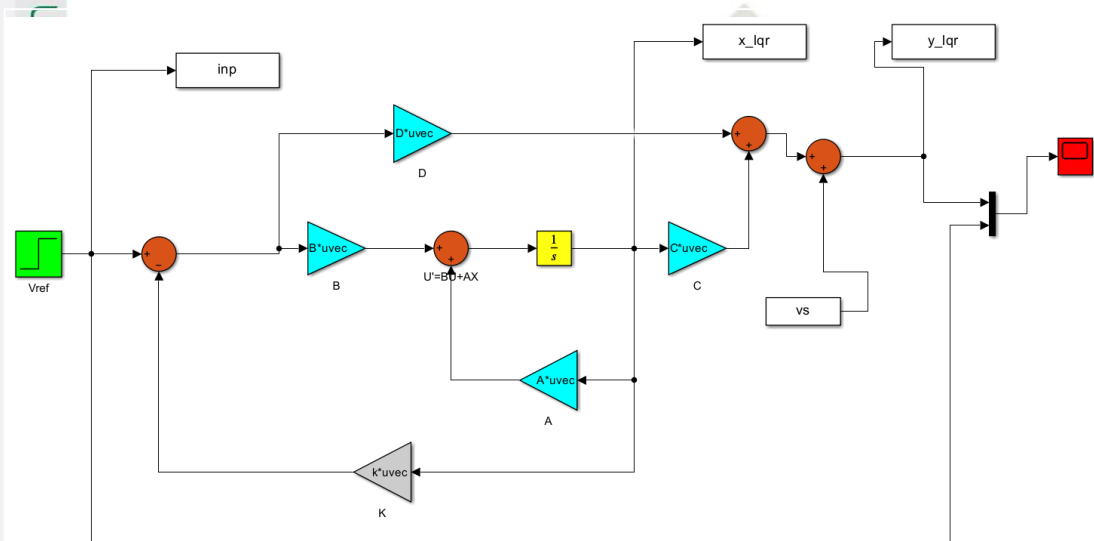
Secara keseluruhan, hasil pengujian ini membuktikan bahwa gangguan pada jalur keluaran memberikan dampak kritis pada respons transien akibat kesalahan persepsi sensor. Namun demikian, ketangguhan struktur LQR tetap menjamin kestabilan akhir sistem dan mampu memulihkan regulasi tegangan terminal dengan akurasi tinggi setelah gangguan pada sisi pengukuran dieliminasi.

4.4. Pengujian dan Analisa AVR dengan *Noise Output*

Pengujian pada skenario ini difokuskan pada pemberian gangguan berupa *noise* pada jalur keluaran (*output*) sistem AVR. Pemberian *noise* pada titik ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi nyata ketika sensor tegangan mengalami gangguan pembacaan, seperti *sensor noise*, interferensi elektromagnetik, *electrical ripple*, ataupun fluktuasi sinyal analog pada transduser. Pada sistem pengendali modern, kualitas sinyal pengukuran sangat

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.

menentukan akurasi aksi pengendali. Oleh karena itu, injeksi *noise* pada *output* penting dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan (*robustness*) pengendali LQR terhadap ketidakpastian yang berasal dari sensor. Konfigurasi *Simulink* yang digunakan untuk pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4-11, di mana blok *noise* ditempatkan langsung pada jalur umpan balik tegangan keluaran.

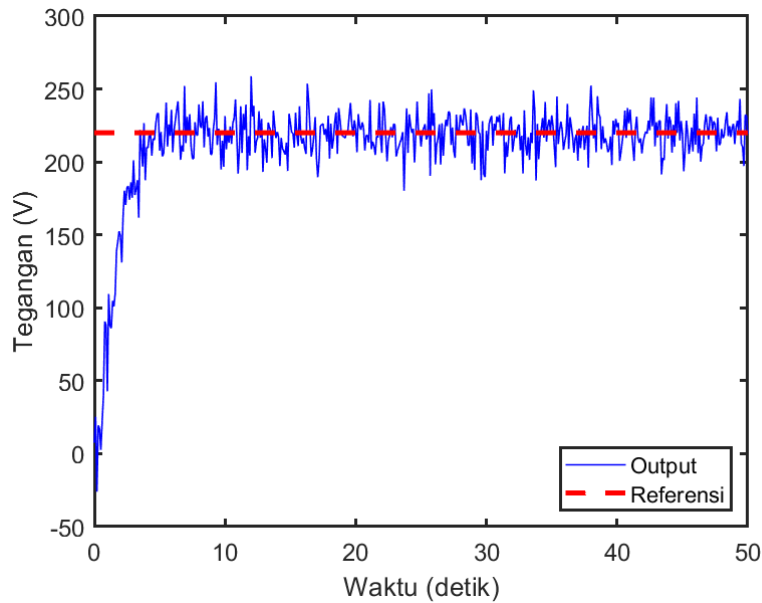


Gambar 4-11 Blok *simulink* AVR LQR dengan *Noise Output*

Sinyal *noise* yang diberikan pada jalur keluaran dibangkitkan menggunakan generator *random noise* dengan amplitudo 6% dari nilai referensi sistem. Penetapan batas 6% didasarkan pada standar umum variasi sinyal pengukuran yang sering digunakan dalam simulasi ketidakpastian sensor, yakni berada dalam rentang $\pm 5\%$ hingga $\pm 10\%$ dari nilai nominal. Persentase ini mencerminkan kondisi gangguan moderat yang masih realistis terjadi pada lingkungan sistem tenaga listrik. Sinyal *noise* kemudian ditambahkan secara *additive* pada tegangan keluaran sehingga pengendali menerima sinyal pengukuran yang telah terdistorsi. Respon sistem terhadap kondisi tersebut divisualisasikan pada Gambar 4-12.

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.



Gambar 4-12 Hasil simulasi AVR LQR dengan gangguan *noise* di sinyal *output*

Gambar 4-12 menunjukkan respon sistem AVR dengan pengendali LQR ketika diberikan gangguan *noise* acak sebesar 6% pada sisi keluaran. Pada fase transien, sistem masih mampu mengikuti peningkatan tegangan menuju nilai referensi 220 V, yang menunjukkan bahwa pengendali LQR tetap efektif dalam menjaga kestabilan dan dinamika awal sistem.

Namun, pada kondisi steady-state, tegangan keluaran mengalami fluktuasi di sekitar nilai referensi akibat pengaruh *noise* pada jalur umpan balik. Secara kuantitatif, kondisi ini tercermin dari nilai RMSE sebesar 35,3416 V, yang menunjukkan adanya deviasi tegangan yang cukup signifikan selama periode simulasi. Nilai RMSE yang relatif besar ini disebabkan oleh fluktuasi acak yang terus-menerus, bukan karena kegagalan pengendali dalam mencapai nilai referensi.

Hal ini terjadi karena pengendali LQR tidak dirancang untuk mereduksi noise pengukuran secara eksplisit, sehingga variasi *noise* ikut mempengaruhi aksi kendali. Meskipun demikian, sistem tetap stabil dan mampu mempertahankan tegangan di sekitar nilai referensi. Untuk meningkatkan kualitas sinyal keluaran dan menurunkan RMSE, diperlukan penambahan filter pengukuran atau penerapan metode kendali *robust*.