

BAB IV

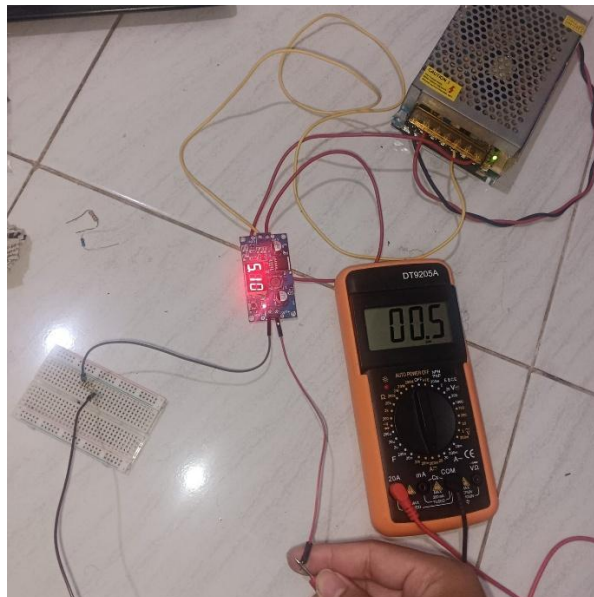
ANALISA DAN PENGUJIAN

4.1 Hasil Pengujian Komponen

Berdasarkan hasil percobaan dan pengujian yang dilakukan selama proses pembuatan alat tugas akhir ini. Bab ini dilakukan untuk mengevaluasi fungsi setiap komponen serta memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan perancangan dan kondisi actual. Hasil dari pengujian digunakan sebagai dasar untuk menilai kesesuaian antara perancangan sistem. Pengujian telah dilakukan mulai dari kinerja dari komponen utama seperti mikrokontroller, sensor, driver, HMI dan juga catu daya. Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem secara keseluruhan untuk memastikan setiap komponen berfungsi sesuai tujuan perancangan.

4.1.1 Pengujian Power Supply 24V 5A Dengan Display LM2596

Pengujian catu daya bertujuan untuk mengecek kestabilan suplai sebelum sistem dijalankan atau dioperasikan. pengujian dilakukan menggunakan alat kalibrasi yaitu multimeter. Pengujian dilakukan seperti pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Pengujian Power Supply Dengan Stepdown LM2596
(Sumber : Pribadi)

Seperti pada Gambar 4.1 pengujian dilakukan dengan menggunakan 2 unit multimeter digital yang di sambungkan secara seri pada input Stepdown setelah power supply unit dan output Stepdown sebelum beban resistor. Cara ini dilakukan untuk mengukur ampere beban Stepdown dan resistor.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Power Supply Dan Stepdown LM2596

No	R (Ω)	Power Supply			Stepdown LM2596		
		V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)
1	100	24	0,18	4,32	12	0,25	3
2	220	24	0,11	2,64	12	0,12	1,44
3	470	24	0,05	1,2	12	0,02	0,24
4	560	24	0,05	1,2	12	0,01	0,12
5	1K	24	0,04	0,96	12	0,05	0,01

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1**. Stepdown LM2596 menghasilkan tegangan yang stabil pada outputnya meskipun ada perubahan pada nilai beban yang digunakan. Serta menunjukkan nilai efisiensi yang berubah ubah sesuai beban yang digunakan dengan nilai angka efisiensi yang baik di beban yang tidak terlalu kecil.

4.1.2 Pengujian Inverter Schneider ATV312

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara sinyal kendali PWM yang dikonversikan menjadi tegangan analog 0–10 V terhadap frekuensi keluaran inverter. Pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa rangkaian PWM to Voltage Converter serta inverter bekerja secara proporsional dan konsisten terhadap perubahan sinyal kendali

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Inverter Schneider ATV312

PWM	Tegangan Input Inverter (0-10V)	Output teoritis (Hz)	Frekuensi Aktual Inverter (Hz)	Error Frekuensi (%)
102	4	20	20	0
112	4,39	21,9	22	0,46
91	3,56	17,8	18	1,12
71	2,78	13,9	14	0,72
76	2,98	14,9	15	0,67

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.2**, tegangan input inverter menunjukkan hubungan yang relatif linier terhadap nilai PWM yang diberikan. Tegangan analog 0–10 V yang dihasilkan oleh modul PWM to Voltage Converter digunakan sebagai sinyal referensi untuk menentukan frekuensi keluaran inverter. Hubungan antara tegangan referensi dan frekuensi inverter mengikuti **persamaan 2.5**.

Hasil perhitungan tersebut sesuai dengan frekuensi aktual inverter yang terbaca sebesar 20 Hz. Pada titik pengujian lainnya seperti PWM 112, 91, 71, dan 76, frekuensi aktual yang dihasilkan juga mendekati nilai teoritis yang dihitung menggunakan persamaan tersebut

Perbedaan kecil antara frekuensi teoritis dan frekuensi aktual menghasilkan error frekuensi yang relatif kecil, yaitu berkisar antara 0% hingga 1,12%, yang menunjukkan bahwa inverter mampu merespons perubahan tegangan input secara konsisten dan proporsional.

4.1.3 Pengujian Motor Induksi 3 Fasa

Pengujian motor induksi tiga fasa dilakukan untuk mengetahui karakteristik kecepatan putaran motor terhadap perubahan frekuensi inverter. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa motor yang digunakan sebagai *prime mover* mampu beroperasi dengan baik dan menghasilkan kecepatan putaran yang sesuai untuk menggerakkan alternator.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

No	Frekuensi (Hz)	RPM Sinkron (Ns)	RPM Estimasi (Nr)	Error (%)
1	20	600	591	1,50
2	30	900	893	0,78
3	40	1200	1189	0,92
4	50	1500	1490	0,67

Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.3**, kecepatan sinkron motor meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi inverter. Kecepatan sinkron motor dihitung menggunakan **persamaan 2.3**.

Namun pada motor induksi, kecepatan rotor tidak dapat mencapai kecepatan sinkron secara penuh karena adanya slip, sehingga kecepatan estimasi motor sedikit lebih rendah dibandingkan kecepatan sinkron. Nilai error antara kecepatan sinkron dan kecepatan estimasi dihitung menggunakan **persamaan 2.4**.

Berdasarkan hasil **persamaan 2.4**, nilai error yang diperoleh berada pada kisaran **0,67% hingga 1,50%**. Nilai ini menunjukkan bahwa kecepatan rotor tidak dapat mencapai kecepatan sinkron secara penuh, yang merupakan karakteristik normal dari motor induksi tiga fasa. Dengan demikian, hubungan antara frekuensi inverter dan kecepatan putaran motor menunjukkan kecenderungan yang linier dan sesuai dengan teori motor induksi.

4.1.4 Pengujian Relay 5V

Pengujian relay dilakukan untuk memastikan bahwa relay dapat bekerja sesuai kegunaannya dalam menghubungkan dan memutus suplai daya pada sistem inverter. Relay dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 melalui sinyal digital yang diberikan pada pin kontrol relay.

```

20:51:33.228 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:34.230 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:35.225 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:36.224 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:37.254 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:38.271 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:39.248 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:40.248 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:41.253 -> [SYS] IDLE | Relay:0 |
20:51:42.247 -> [SYS] RUN | Relay:1 |
20:51:43.265 -> [SYS] RUN | Relay:1 |
20:51:44.252 -> [SYS] RUN | Relay:1 |
20:51:45.262 -> [SYS] RUN | Relay:1 |

```

Gambar 4. 2 Kondisi Relay

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2**, terlihat bahwa Ketika sistem berada pada kondisi IDLE, status relay bernilai 0, berarti menandakan bahwa relay dalam keadaan tidak aktif atau relay terbuka sehingga inverter belum mendapatkan suplai daya. Selanjutnya Ketika sistem menerima perintah RUN, status sistem berubah dari IDLE menjadi RUN dan nolai relay berubah menjadi 1, perubahan ini menunjukkan bahwa relay telah aktif dan kontak relay tertutup sehingga suplai daya dapat dialirkan ke inverter. Pengujian ini menunjukkan bahwa relay mampu bekerja dengan baik sesuai dengan logika kontrol yang diberikan oleh mikrokontroler. Relay dapat merespon perubahan status sistem dengan benar, sehingga dapat digunakan sebagai komponen penghubung dan pemutus daya dalam sistem.

4.1.5 Pengujian Modul PWM To Voltage Converter

Percobaan Modul PWM To Voltage Converter bertujuan untuk menganalisis proses konversi sinyal pulse width modulation (PWM) menjadi tegangan analog yang besarnya sebanding dengan nilai duty cycle. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik hubungan antara perubahan duty cycle terhadap tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul ini.

Sinyal pwm dari mikrokontroler ESP32 dialirkan ke rangkaian (low pass filter) guna meredam komponen frekuensi tinggi, sehingga diperoleh tegangan

searah (DC) rata-rata yang relative stabil, Variasi *duty cycle* diberikan secara bertahap pada rentang nilai tertentu, kemudian tegangan keluaran diukur menggunakan multimeter sebagai alat ukur pembanding. Hasil pengukuran selanjutnya dianalisis dengan membandingkan nilai tegangan aktual terhadap nilai teoritis yang dihitung berdasarkan hubungan antara *duty cycle* dan tegangan masukan. Parameter yang dikaji meliputi tingkat linearitas, besarnya galat pengukuran, serta kestabilan tegangan keluaran pada setiap variasi *duty cycle*. Hasil percobaan ini digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja rangkaian dalam menyediakan sinyal tegangan kendali pada sistem.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Modul PWM to Voltage Converter

Nilai Input PWM	Output Tegangan (V)	Output Teoritis (V)	Error %
51	2	2	0
102	4	4	0
153	6	6	0
204	8	8	0
255	10	10	0

Hasil pengujian modul PWM To Voltage pada **tabel 4.4**, menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul PWM To Voltage Converter sesuai dengan nilai teoritis pada setiap variasi input PWM. Pada nilai PWM 51, 102, 153, 204, hingga 255, tegangan keluaran masing-masing sebesar 2 V, 4 V, 6 V, 8 V, dan 10 V, keluaran tersebut dinyatakan sesuai dengan perhitungan teoritis, perhitungannya sendiri bisa dilihat pada persamaan **2.9** yang mana ketika PWM 102 maka hasil perhitungan tersebut sesuai dengan hasil pengukuran yang diperoleh pada tabel , yaitu sebesar 4 V. hal ini menunjukkan bahwa modul PWM To Voltage Converter memiliki karakteristik keluaran yang linier dan akurat. Kesesuaian antara nilai teoritis dan hasil pengukuran dapat menjadi bukti bahwa sinyal PWM yang dihasilkan oleh ESP32 dapat dikonversi menjadi tegangan analog dengan baik, sehingga layak digunakan sebagai referensi untuk mengendalikan inverter.

4.1.6 Pengujian PZEM 004T

Pengujian sensor PZEM-004T dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pengukuran parameter tegangan, arus, frekuensi, dan daya yang akan digunakan sebagai sinyal umpan balik dalam sistem kendali. Sensor dipasang pada sisi keluaran 220 VAC setelah transformator step-up, kemudian hasil pengukurannya dibandingkan dengan alat ukur referensi pada beberapa variasi beban resistif sebesar 5–10 Watt. Selain itu, interval waktu pembacaan data turut dianalisis untuk memverifikasi latensi sebesar 300 ms, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan periode loop PID. Variabel yang dianalisis meliputi tegangan, arus dan daya yang dihitung berdasarkan perbandingan antara hasil pengukuran sensor dan multimeter sebagai acuan

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian PZEM 004T Tanpa Beban

Pengujian	Vout PZEM	V ref (V)	Arus PZEM	I ref	Error Voltase (%)	Error Arus (%)	Kecepatan putar (RPM)
1	251,9	249,1	0,09	0,1	1,12	-10	1490
2	251,9	249,5	0,09	0,1	0,96	-10	1490
3	251,9	249,2	0,09	0,1	1,08	-10	1490
4	251,9	250,8	0,09	0,1	0,44	-10	1490
5	251,9	249,7	0,09	0,1	0,88	-10	1490

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian PZEM 004T DenganBeban

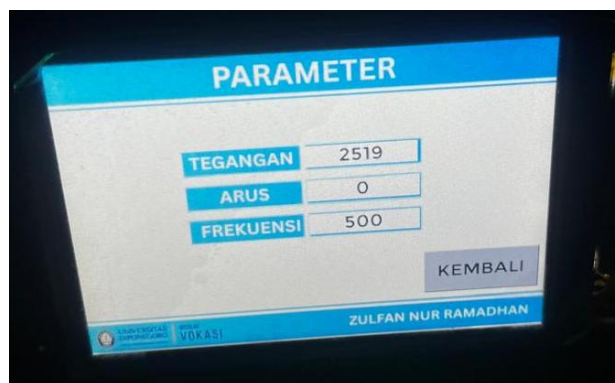
Pengujian	Vout PZEM	V ref (V)	Arus PZEM	I ref	Error Voltase (%)	Error Arus (%)	Kecepatan putar (RPM)
1	144,1	142	0,25	0,23	1,48	8,70	1490
2	144,3	142	0,25	0,23	1,62	8,70	1490
3	144,1	142	0,25	0,23	1,48	8,70	1490
4	144	142	0,25	0,23	1,41	8,70	1490
5	144,1	142	0,25	0,23	1,48	8,70	1490

Pada pengujian komponen utama yang berfungsi sebagai feedback sistem, data pengujian bisa dilihat pada **Tabel. 4.5** Dan **Tabel. 4.6** pengujian sensor PZEM-004T dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan dengan membandingkan nilai yang ditampilkan pada sistem (HMI Nextion) terhadap nilai referensi yang diperoleh dari pengukuran menggunakan multimeter dan clamp meter digital yang telah terkalibrasi. Parameter yang dibandingkan meliputi tegangan, arus, serta kecepatan putaran motor. Pengujian dilakukan dua kali, yaitu pada saat kondisi tanpa beban dan kondisi dengan beban. Nilai tegangan referensi (V_{ref}) dan arus referensi (I_{ref}) diperoleh melalui pengukuran langsung pada sisi keluaran alternator menggunakan alat ukur referensi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.3** dan **Gambar 4.4**. Nilai error dihitung berdasarkan selisih antara pembacaan sensor dan alat ukur referensi, kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap nilai referensi

Pada kondisi tanpa beban, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan yang dibaca oleh sensor PZEM-004T sebesar 251,9 V memiliki selisih terhadap alat ukur referensi pada rentang 0,44% hingga 1,12%. Nilai error tersebut masih tergolong kecil dan masih berada dalam batas toleransi pengukuran. Perbedaan pembacaan ini dapat dipengaruhi oleh toleransi akurasi masing-masing alat ukur, perbedaan metode pengukuran nilai RMS, serta kemungkinan adanya perbedaan waktu sampling antara sensor dan alat referensi. Dengan rentang error rata-rata sekitar 0,9%, kinerja pengukuran tegangan pada kondisi tanpa beban dapat dinyatakan cukup baik dan memenuhi kebutuhan sistem sebagai sinyal umpan balik. Pada pengukuran arus kondisi tanpa beban, selisih pembacaan relatif lebih besar secara persentase. Perbedaan yang terjadi dapat disebabkan oleh keterbatasan resolusi tampilan alat ukur referensi maupun pembulatan nilai pengukuran. Selain itu, pada arus yang relatif kecil, sensitivitas dan resolusi alat ukur sangat mempengaruhi ketelitian pembacaan.

Pada kondisi dengan beban 35 W, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan yang dibaca oleh sensor PZEM berada pada rentang 144,0 V hingga 144,3

V, sedangkan tegangan referensi yang diperoleh dari alat ukur pembanding bernilai 142 V. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa error voltase berada pada rentang 1,41% hingga 1,62%. Nilai error ini masih tergolong kecil dan menunjukkan bahwa pembacaan tegangan oleh sensor PZEM memiliki tingkat akurasi yang baik pada kondisi berbeban. Untuk pengukuran arus pada beban 35 W, sensor PZEM menunjukkan nilai sebesar 0,25 A, sedangkan arus referensi sebesar 0,23 A. Selisih ini menghasilkan error arus sebesar 8,70%. Meskipun secara persentase terlihat lebih besar dibandingkan error tegangan, selisih arus secara absolut relatif kecil yaitu sebesar 0,02 A. Besarnya nilai persentase error dipengaruhi oleh nilai arus yang kecil, sehingga perbedaan kecil dalam pembacaan menghasilkan persentase yang tampak lebih besar. Dengan demikian, pada kondisi beban 35 W, sensor PZEM menunjukkan kinerja yang baik dalam pembacaan tegangan dan masih cukup memadai dalam pembacaan arus. Nilai error yang diperoleh masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk sistem monitoring dan sebagai sinyal umpan balik dalam pengendalian sistem



Gambar 4. 3 pengujian sensor PZEM-004T Pada Tampilan HMI Nextion

(Sumber : Pribadi)



Gambar 4. 4 Data Pada Output Trafo Dengan Multimeter

(Sumber : Pribadi)

4.1.7 Pengujian Motor Driver BTS7960

Pengujian driver BTS7960 dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian antara tegangan keluaran aktual dengan tegangan referensi teoritis yang dihitung berdasarkan nilai PWM dan tegangan suplai. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi keluaran driver saat bekerja dengan beban kumparan rotor alternator, serta memastikan bahwa nilai tegangan dan arus yang dihasilkan masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk sistem eksitasi

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Motor Driver BTS7960

No	Duty cycle %	PWM	Vin BTS7960 (V)	Vout BTS7960 (V)	Vout teoritis	Arus Output BTS7960	Error Vout (%)
1	50	127,5	24	10,90	11,75	2,1	7,23
2	50	127,5	24	10,93	11,75	2,2	6,98
3	50	127,5	24	10,90	11,75	2,2	7,23
4	50	127,5	24	10,95	11,75	2,2	6,81

Pada pengujian driver BTS7960 ini dilakukan dalam kondisi berbeban, dimana beban yang digunakan adalah kumparan rotor alternator (brush rotor) yang berfungsi sebagai kumparan medan. Kumparan tersebut merupakan beban nyata yang bersifat induktif dan digunakan untuk membangkitkan medan magnet pada rotor alternator. Pengukuran tegangan dan arus dilakukan menggunakan multimeter seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.5** Dan **Gambar 4.6**. Nilai tegangan referensi (V_{ref}) pada **Tabel 4.7**. diperoleh dari perhitungan manual berdasarkan

nilai PWM yang diberikan serta tegangan suplai (V_{in}) pada driver BTS7960. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran aktual driver BTS7960 lebih rendah dibandingkan nilai tegangan teoritis yang dihitung berdasarkan duty cycle. Rata-rata error yang diperoleh berada pada kisaran sekitar 6,81% hingga 7,23%. Selisih ini disebabkan oleh adanya penurunan tegangan pada rangkaian internal driver saat arus mengalir ke kumparan medan. Karena kumparan rotor bersifat induktif, karakteristik arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sinyal PWM tidak sepenuhnya mengikuti perhitungan ideal.



Gambar 4. 5 Pengukuran Input Tegangan BTS7960

(Sumber : Pribadi)



Gambar 4. 6 Pengukuran Output Pada BTS7960

(Sumber : Pribadi)

4.1.8 Pengujian Alternator dan Trafo

Pengujian alternator dan trafo dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar sistem pembangkit sebelum kontrol PI diaktifkan. Pada tahap ini, eksitasi alternator pada kondisi konstan menggunakan duty cycle 50%, sehingga perubahan tegangan keluaran murni dipengaruhi oleh kondisi beban dan karakteristik mekanik prime mover. Alternator digerakkan oleh motor induksi yang dikendalikan inverter dengan kecepatan dijaga tetap pada 1490 RPM. Tegangan keluaran diukur pada sisi sekunder transformator step-up dalam kondisi tanpa beban maupun dengan penambahan beban secara bertahap hingga 35 W.

Pengujian ini bertujuan untuk mengamati penurunan tegangan akibat pembebanan, mengetahui kemampuan sistem mempertahankan tegangan pada kondisi eksitasi tetap, serta menentukan batas kerja sistem sebelum diterapkan close loop menggunakan kontrol PI melalui pengaturan frekuensi inverter.

Tabel 4. 8 Hasil Percobaan Alternator Dan Trafo Tanpa Beban

Pengujian	Duty Cycle %	PWM	Vin Alternator (V)	Vout Alternator (V)	Arus Alternator (A)	Vout Trafo (V)	Arus Trafo (A)	Kecepatan Putar (RPM)
1	50	127,5	10,5	10,13	2,6	249	0,1	1490
2	50	127,5	10,7	10,40	2,6	249	0,1	1490

Tabel 4. 9 Hasil Percobaan Alternator Dan Trafo Dengan Beban

Pengujian	Duty Cycle %	PWM	Beban (Watt)	Vin Alternator (V)	Vout Alternator (V)	Arus Alternator (A)	Vout Trafo (V)	Arus Trafo (A)	Kecepatan Putar (RPM)
1	50	127,5	0	10,5	10,13	2,6	249	0,1	1490
2	50	127,5	5	10,7	10,20	2,9	228	0,1	1490
3	50	127,5	15	10,3	10,13	3,1	190	0,2	1490
4	50	127,5	25	10,5	10,15	3,9	165	0,2	1490
5	50	127,5	35	10,3	10,13	4,5	142	0,2	1490

Berdasarkan hasil pengujian tanpa beban pada **Tabel 4.8** , duty cycle pada kondisi tanpa beban yaitu sebesar 50% (PWM 127,5), diperoleh tegangan keluaran alternator berkisar antara 10,13 V hingga 10,40 V. Tegangan tersebut kemudian

dinaikkan oleh trafo step-up sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 249 V. Arus pada sisi trafo tercatat 0,1 A dan kecepatan putar prime mover stabil pada 1490 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja normal pada kondisi tanpa beban, Dimana alternator mampu menghasilkan tegangan yang stabil dan trafo mampu menaikkan tegangan sesuai dengan rasio nya.

Pada kondisi dengan beban pada **tabel 4.9**, dilakukan penambahan beban secara bertahab sebesar 5 W, 15 W, 25 W, dan 35 W. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, tegangan pada sisi sekunder trafo mengalami penurunan dari 249 V pada kondisi tanpa beban menjadi 142 V pada beban 35 W. Sementara itu, arus alternator meningkat dari 2,6 A menjadi 4,5 A. Meskipun terjadi peningkatan arus dan penurunan tegangan, kecepatan outar motor tetap stabil pada 1490 RPM. Penurunan tegangan pada sisi sekunder trafo terjadi akibat meningkatnya arus yang mengalir ke beban. Kenaikan arus tersebut menyebabkan terjadinya *losses* tegangan pada lilitan transformator serta penurunan tegangan akibat impedansi internal alternator. Semakin besar arus beban, maka semakin besar pula penurunan tegangan yang terjadi. Kondisi ini merupakan karakteristik umum pada sistem pembangkit listrik, khususnya ketika sistem eksitasi tidak dilengkapi dengan pengaturan otomatis untuk mempertahankan tegangan keluaran tetap konstan terhadap perubahan beban.



Gambar 4. 7 Pengukuran Tegangan Saat Beban 35 W Aktif

(Sumber : Pribadi)



Gambar 4. 8 Tegangan Output Pada Alternator

(Sumber : Pribadi)

4.1.9 Pengujian Nextion NX4832F035

Pengujian HMI difokuskan pada evaluasi kinerja pembacaan data serta keandalan komunikasi antara mikrokontroler dan perangkat tampilan. Parameter yang dianalisis meliputi respons perpindahan halaman (*page switching*), kecepatan pembaruan teks sensor, serta proses penampilan data dalam bentuk *waveform*. Evaluasi dilakukan berdasarkan waktu tunda (*latency*) dan kemungkinan terjadinya kesalahan transmisi data. HMI dinyatakan berfungsi dengan baik apabila proses pembaruan data berlangsung dalam rentang waktu $\leq 0,5-0,8$ detik dan tidak ditemukan adanya error selama proses komunikasi. Pada sistem yang dirancang, diterapkan mekanisme penyaringan (*filtering*) data untuk meminimalkan pembacaan yang tidak stabil atau terdeteksi sebagai error, data yang mengalami fluktuasi kecil akan diproses sehingga menghasilkan nilai yang lebih stabil dan representative sebelum ditampilkan pada HMI nextion.

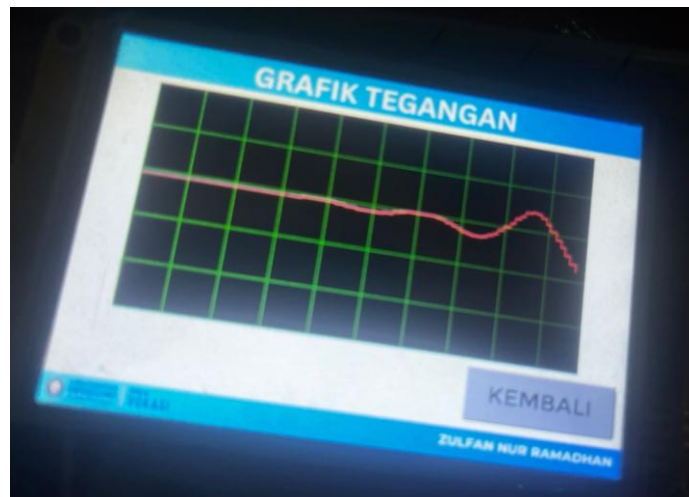
Pengujian komponen ini mencakup pemeriksaan sinkronisasi antara data sensor dan representasi grafis pada fitur waveform. Grafik yang ditampilkan pada halaman monitoring digunakan sebagai acuan evaluasi karakteristik respon sistem, khususnya dalam proses penyetelan parameter pengendali apabila diperlukan peningkatan performa sistem. Tampilan nilai pada setiap elemen antarmuka HMI Nextion menunjukkan bahwa komponen ini mampu menampilkan data secara konsisten dan real-time. Pembaruan data yang ditampilkan, sebagaimana dapat diamati pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**, menunjukkan kesesuaian antara

informasi yang ditampilkan pada HMI dan data yang terbaca pada serial monitor. Dengan demikian, proses komunikasi data antara mikrokontroler dan HMI Nextion dapat dinyatakan berjalan dengan baik dan sesuai dengan rancangan sistem.



Gambar 4. 9 Pengujian Penggunaan Button Untuk Mengganti Halaman Pada HMI

(Sumber : Pribadi)



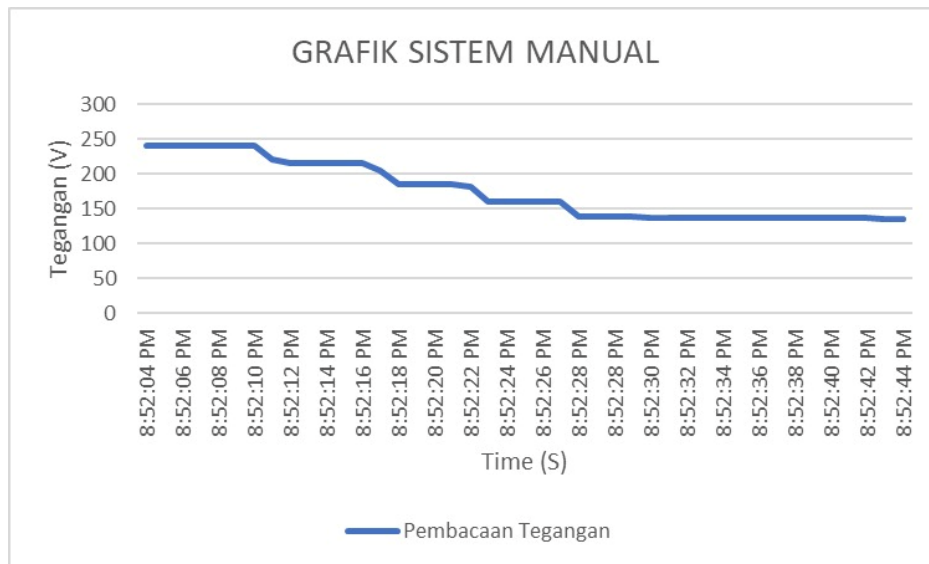
Gambar 4. 10 Pengujian Update Input Data Pada Grafik Waveform HMI Nextion

(Sumber : Pribadi)

4.2 Pengujian Mode Manual

Pengujian mode manual dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem ketika inverter dioperasikan dengan frekuensi tetap tanpa menggunakan kontrol otomatis. Pada pengujian ini frekuensi inverter diatur secara manual melalui HMI dengan nilai setpoint 50 Hz, sehingga kecepatan motor induksi sebagai prime mover relatif

konstan selama pengujian berlangsung. Pengujian dilakukan dengan menambahkan beban secara bertahap untuk melihat pengaruhnya terhadap tegangan keluaran generator. Hasil pengujian terdapat pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 Grafik Hasil Pengujian Mode Manual

(Sumber : Pribadi)

Pada kondisi awal sistem dioperasikan tanpa beban, tegangan yang dihasilkan dari generator yaitu 240 V. nilai ini menunjukkan bahwa pada frekuensi inverter 50 Hz generator mampu menghasilkan tegangan yang cukup tinggi, selanjutnya dilakukan penambahan beban sebesar 5 W – 35 W, setelah beban dihubungkan tegangan generator mengalami penurunan. Penurunan ini terjadi karena generator mulai menyuplai daya ke beban sehingga arus yang mengalir meningkat. Penurunan tegangan yang terjadi menunjukkan bahwa sistem pada mode manual tidak memiliki mekanisme pengaturan untuk menjaga tegangan tetap konstan Ketika terjadi perubahan beban.

Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa pada mode manual tegangan keluaran generator sangat dipengaruhi oleh perubahan beban yang diberikan. Ketika beban meningkat, tegangan keluaran akan menurun karena frekuensi inverter sebagai penggerak prime mover tidak mengalami penyesuaian. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol otomatis seperti kontrol PI untuk

mengatur frekuensi inverter sehingga tegangan keluaran generator dapat dipertahankan mendekati nilai setpoint meskipun terjadi perubahan beban

4.3 Hasil Pengujian Sistem Kontrol PI

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap sistem kendali Propotional-Integral (PI) yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan dalam menjaga setpoint sebesar 110 V serta menilai respon sistem terhadap gangguan beban. Penentuan parameter K_p dan K_i dilakukan secara empiris melalui beberapa percobaan (trial) hingga diperoleh kombinasi parameter yang memberikan respon paling optimal.

4.3.1 Penentuan Parameter PI Secara Empiris

Penentuan parameter kontrol dilakukan dengan metode trial and error karena karakteristik sistem prime mover-generator bersifat nonlinier dan dipengaruhi oleh dinamika mekanik serta respon inverter. Setiap kombinasi parameter diuji pada kondisi operasi yang sama untuk memastikan hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara adil. Evaluasi dilakukan melalui dua pengujian, yaitu respon start-up dan respon step load. Respon start up merupakan pengamatan terhadap perilaku sistem sejak pertama kali dinyalakan hingga mencapai setpoint dengan beban tertentu yang telah aktif sejak awal. Sementara itu, respon step load merupakan pengujian terhadap kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan Ketika beban dinyalakan secara tiba-tiba setelah sistem berada pada kondisi stabil

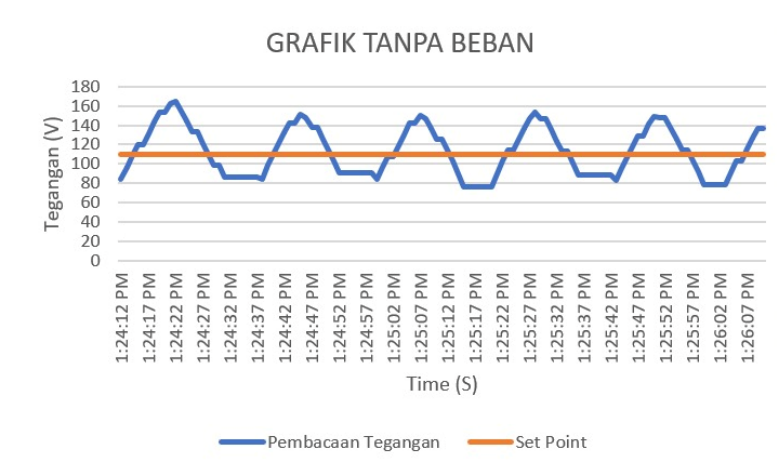
a) Hasil Pengujian Parameter PI Trial 1

Pada percobaan pertama mdigunakan parameter $K_p = 0,1$ dan $K_i = 0,10$ parameter ini dipilih sebagai nilai awal untuk mengamati karakteristik dasar respon sistem

- Pengujian Respon Start-Up Trial 1

Pengujian dilakukan dengan menyalakan sistem dalam mode otomatis dengan setpoint 110 V. Beban telah aktif sejak awal pengujian dan divariasikan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban. Respon tegangan diamati pada

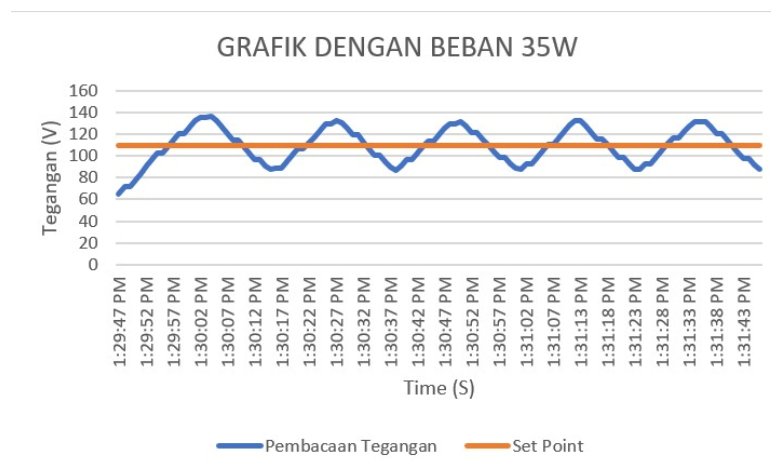
saat sistem dinyalakan hingga mencapai kondisi tunak. Percobaan dilakukan dalam waktu 2 menit, hasil percobaan terdapat pada **gambar 4.12**.



Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Trial 1 Tanpa Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan hasil pengamatan pada **gambar 4.12**, tegangan keluaran generator menunjukkan osilasi yang cukup besar terhadap setpoint. Tegangan maksimum tercatat mencapai sekitar 160 V, sedangkan tegangan minimum turun hingga sekitar 80 V. Nilai ini menunjukkan overshoot yang signifikan serta fluktuasi tegangan yang berulang secara periodik. Respon sistem tidak menunjukkan kecenderungan untuk meredam menuju kondisi tunak, melainkan mengalami osilasi berkelanjutan (sustained oscillation). Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi parameter K_p dan K_i pada Trial 1 terlalu agresif sehingga menghasilkan aksi koreksi yang berlebihan. Nilai K_i yang relatif besar menyebabkan akumulasi error yang cepat, sehingga sistem mengalami overshoot dan undershoot secara berulang. Dengan demikian, parameter pada Trial 1 dinilai belum optimal karena sistem belum mencapai kestabilan yang diharapkan meskipun tidak diberikan beban. Untuk percobaan start-up dengan beban bisa dilihat pada **gambar 4.13**.

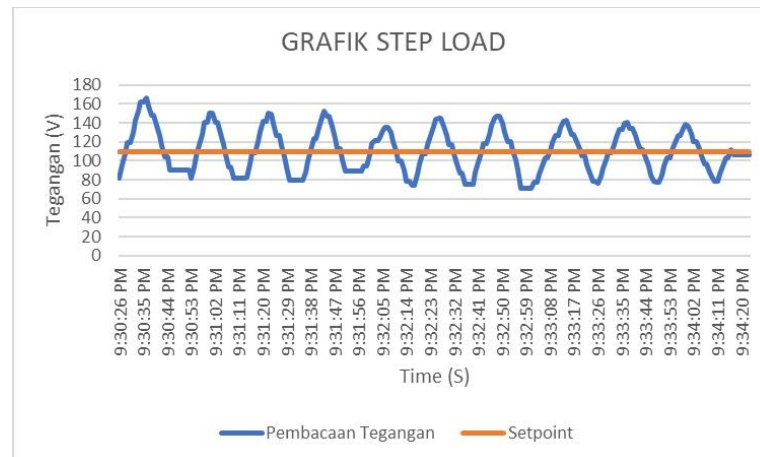


Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Trial 1 Dengan Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan hasil pengamatan dari **gambar 4.13**, tegangan keluaran menunjukkan fluktuasi yang signifikan terhadap setpoint. Tegangan maksimum tercatat mencapai sekitar 135–140 V, sedangkan tegangan minimum turun hingga sekitar 85–90 V. Hal ini menunjukkan terjadinya overshoot dan undershoot yang cukup besar. Osilasi tegangan terjadi secara berulang dan tidak menunjukkan kecenderungan untuk meredam menuju kondisi tunak. Kondisi ini mengindikasikan bahwa parameter kontrol yang digunakan masih terlalu agresif, sehingga aksi koreksi sistem menjadi berlebihan. Nilai K_i yang relatif besar menyebabkan akumulasi error yang cepat dan memicu osilasi berkelanjutan. Dengan demikian, parameter pada Trial 1 dinilai belum memenuhi kriteria kestabilan sistem, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban.

- Pengujian Respon Step Load Trial 1



Gambar 4.14 Hasil Pengujian Step Load Trial 1

(Sumber : Pribadi)

Pengujian step load pada Trial 1 dilakukan dengan parameter kontrol PI sebesar $K_p = 0,1$ dan $K_i = 0,10$. Sistem dijalankan hingga mendekati setpoint 110 V, kemudian diberikan penambahan beban sebesar 5 W dan dilanjutkan 10 W. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.14, sistem menunjukkan respon yang tidak stabil. Setelah penambahan beban, tegangan mengalami penurunan sesaat kemudian naik melampaui setpoint dengan amplitudo yang besar dan berulang.

Pada penambahan beban 10 W, fluktuasi semakin besar dengan tegangan maksimum mencapai sekitar 160–170 V dan minimum sekitar 70–80 V. Osilasi yang terjadi tidak menunjukkan peredaman menuju kondisi tunak, sehingga sistem belum stabil. Ditinjau dari settling error, sistem tidak memiliki nilai error tunak yang jelas karena tidak mencapai kondisi steady-state. Namun secara rata-rata tegangan berada di sekitar setpoint dengan error sekitar ± 2 V ($\pm 1,8\%$). Meskipun demikian, deviasi sesaat sangat besar sehingga menunjukkan performa sistem yang kurang baik. Hal ini disebabkan oleh parameter PI yang terlalu agresif, terutama nilai K_i yang menyebabkan akumulasi error berlebih. Akibatnya, terjadi overshoot dan undershoot yang signifikan. Oleh karena itu, parameter pada Trial 1 perlu dituning ulang agar sistem menjadi lebih stabil

b) Hasil Pengujian Parameter PI Trial 2

Pada percobaan kedua dilakukan penyesuaian parameter kontrol PI berdasarkan hasil Trial 1, khususnya dengan menurunkan nilai konstanta integral untuk mengurangi efek akumulasi error yang berlebihan. Parameter yang digunakan pada Trial 2 adalah $K_p = 0,1$ dan $K_i = 0,010$. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dengan setpoint tegangan sebesar 110 V.

- Pengujian Respon Start-Up Trial 2

pengujian dilakukan dengan kondisi yang sama seperti Trial 1. Respon sistem terhadap variasi beban diamati sejak kondisi awal hingga mencapai setpoint. Hasil percobaan dapat dilihat pada **Gambar 4.15**.

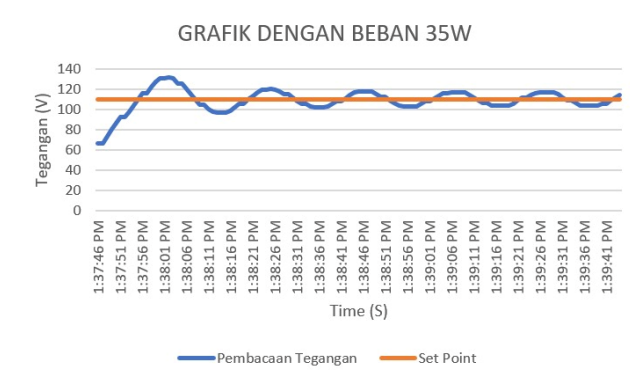


Gambar 4. 15 Hasil Pengujian Trial 2 Tanpa Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan hasil pengamatan pada **Gambar 4.15**, tegangan keluaran generator masih menunjukkan fluktuasi terhadap setpoint. Tegangan maksimum tercatat berada pada kisaran 150–155 V, sedangkan tegangan minimum turun hingga sekitar 75–80 V. Dibandingkan dengan Trial 1, penurunan nilai K_i menyebabkan respon integral menjadi lebih ringan sehingga kecenderungan osilasi sedikit berkurang. Namun demikian, osilasi masih terjadi secara periodik dan belum menunjukkan peredaman menuju kondisi

tunak yang stabil. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa meskipun pengurangan nilai K_i memberikan perbaikan, kombinasi parameter pada Trial 2 masih belum memenuhi kriteria kestabilan tegangan yang diharapkan. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian lanjutan pada parameter PI agar tegangan keluaran dapat lebih cepat mencapai setpoint dan stabil dengan fluktuasi yang lebih kecil. Untuk percobaan start-up dengan beban bisa dilihat pada **gambar**

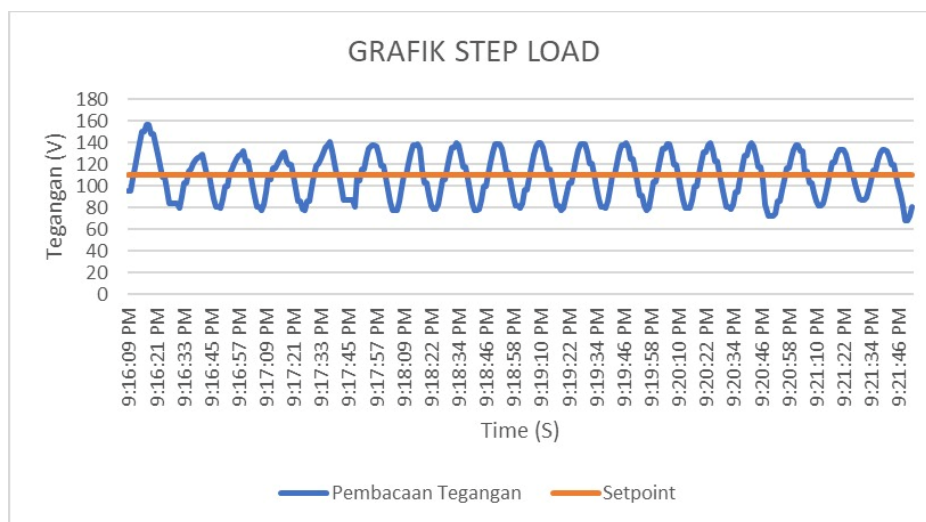


Gambar 4. 16 Hasil Pengujian Trial 2 Dengan Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada **Gambar 4.16**, sistem menunjukkan respon awal berupa kenaikan tegangan dari kondisi awal menuju setpoint. Tegangan maksimum tercatat sekitar 130–135 V sebelum mengalami penurunan dan berosilasi di sekitar nilai setpoint. Dibandingkan dengan Trial 1, amplitudo osilasi pada Trial 2 terlihat lebih kecil dan menunjukkan kecenderungan peredaman. Setelah beberapa saat, fluktuasi tegangan berada pada kisaran yang lebih sempit di sekitar 110 V. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan nilai K_i berhasil mengurangi efek akumulasi error yang berlebihan sehingga sistem menjadi lebih stabil. Meskipun demikian, masih terdapat osilasi kecil yang menunjukkan bahwa parameter kontrol belum sepenuhnya optimal. Secara keseluruhan, Trial 2 menunjukkan peningkatan kestabilan sistem dibandingkan Trial 1, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban.

- Pengujian Respon Step Load Trial 2



Gambar 4. 17 Hasil Pengujian Step Load Trial 2

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada Gambar 4.17, sistem menunjukkan respon yang sangat berosilasi. Tegangan maksimum tercatat mencapai sekitar 150–160 V, sedangkan tegangan minimum turun hingga sekitar 65–75 V. Osilasi ini terjadi secara berulang dan tidak menunjukkan kecenderungan meredam menuju kondisi tunak. Setiap penambahan beban menyebabkan penurunan tegangan sesaat, namun respon kontrol PI justru menghasilkan kenaikan tegangan yang berlebihan hingga melampaui setpoint secara signifikan. Pola ini terus berulang sehingga sistem mengalami fenomena hunting.

Ditinjau dari settling time, sistem tidak memiliki waktu tunak yang jelas karena tegangan tidak pernah masuk dan bertahan dalam batas toleransi tertentu di sekitar setpoint (misalnya $\pm 5\%$ dari 110 V, yaitu sekitar 104,5–115,5 V). Tegangan terus keluar-masuk dari batas tersebut sehingga dapat disimpulkan bahwa settling time tidak tercapai (tidak terdefinisi). Dari sisi error, secara rata-rata tegangan masih berada di sekitar nilai setpoint dengan error kecil (sekitar ± 2 –5 V). Namun, secara dinamis terjadi deviasi yang sangat besar, dengan selisih terhadap setpoint dapat mencapai lebih dari ± 40 –50 V.

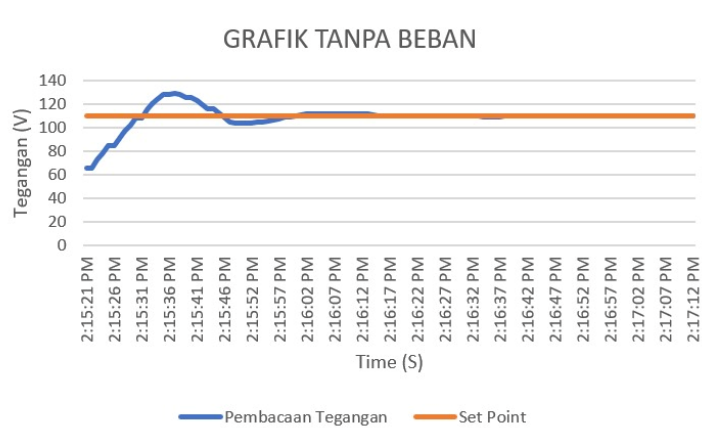
Hal ini menunjukkan bahwa meskipun error rata-rata kecil, performa sistem secara keseluruhan tetap buruk karena fluktuasi yang tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa nilai konstanta integral (K_i) yang digunakan terlalu besar sehingga menyebabkan akumulasi error secara cepat (integral wind-up). Akibatnya, sistem menjadi sangat sensitif terhadap perubahan beban dan menghasilkan respon yang tidak stabil. Dengan demikian, parameter pada Trial 2 tidak memenuhi kriteria kestabilan sistem dan memerlukan penyesuaian untuk mengurangi amplitudo osilasi serta memperoleh respon yang lebih terkendali

c) Hasil Pengujian Parameter PI Trial 3

Pada percobaan ketiga dilakukan penyempurnaan parameter kontrol PI dengan menurunkan konstanta integral untuk memperoleh respon yang lebih stabil. Parameter yang digunakan pada Trial 3 adalah $K_p = 0,1$ dan $K_i = 0,0010$. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dengan setpoint tegangan sebesar 110 V.

- Pengujian Respon Start-Up Trial 3

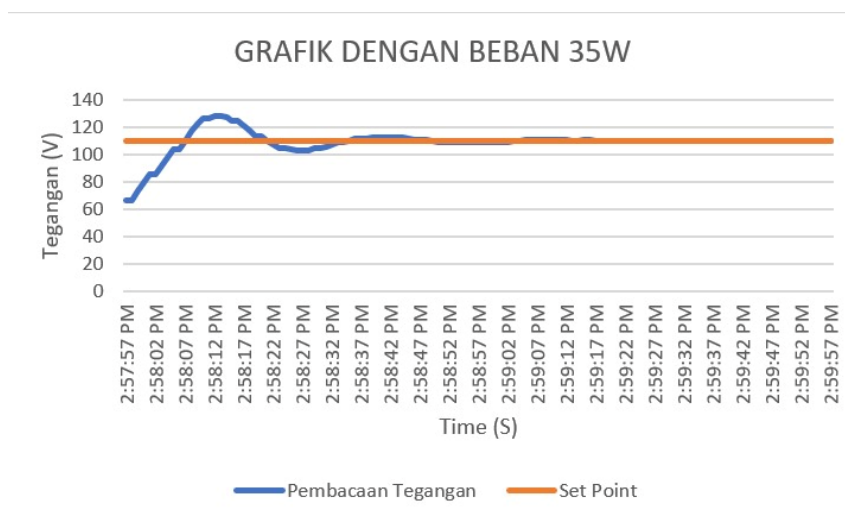
pengujian dilakukan dengan kondisi yang sama seperti Trial 1 dan 2. Respon sistem terhadap variasi beban diamati sejak kondisi awal hingga mencapai setpoint. Hasil percobaan dapat dilihat pada **Gambar 4.18**



Gambar 4. 18 Hasil Pengujian Trial 3 Tanpa Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada **gambar 4.18**, tegangan keluaran meningkat dari kondisi awal menuju setpoint dan mencapai nilai maksimum sekitar 125–130 V sebelum mengalami penurunan dan mendekati nilai setpoint. Setelah fase transien, tegangan terlihat stabil di sekitar 110 V dengan fluktuasi yang relatif kecil. Respon ini menunjukkan adanya peredaman osilasi dan sistem mampu mencapai kondisi tunak. Dibandingkan dengan Trial 1 dan Trial 2, Trial 3 memberikan respon yang lebih stabil karena penurunan nilai Ki mengurangi efek akumulasi error yang berlebihan. Dengan demikian, parameter pada Trial 3 dinilai lebih mendekati parameter optimal untuk menjaga kestabilan tegangan pada kondisi tanpa beban. Untuk percobaan start-up dengan beban bisa dilihat pada **gambar 4.19**



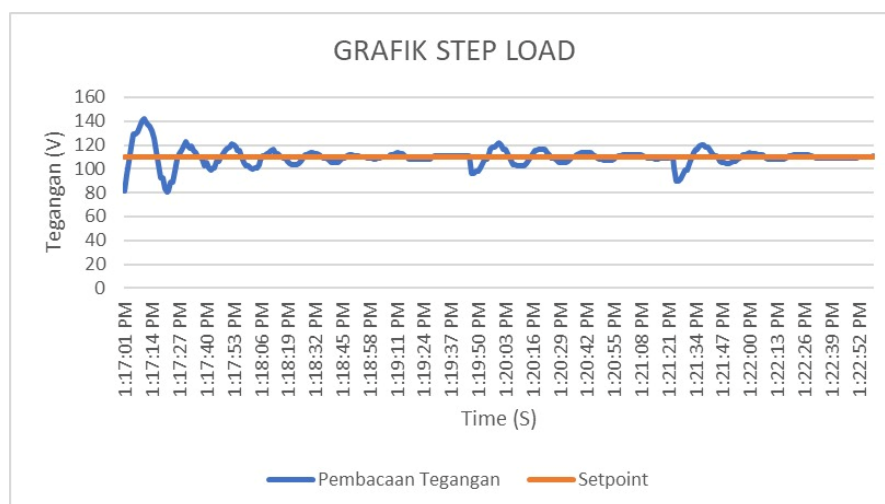
Gambar 4. 19 Hasil Pengujian Trial 3 Dengan Beban

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada **Gambar 4.19**, tegangan keluaran meningkat dari kondisi awal menuju setpoint dan mengalami overshoot awal hingga sekitar 125–130 V. Setelah fase transien, tegangan mengalami penurunan ringan dan kemudian stabil di sekitar nilai setpoint. Fluktuasi yang terjadi setelah sistem mencapai kondisi tunak relatif kecil dan tidak menunjukkan osilasi berulang yang signifikan. Dibandingkan dengan Trial 1 dan Trial 2, Trial 3 menunjukkan peningkatan kestabilan yang signifikan.

Penurunan nilai K_i berhasil mengurangi efek akumulasi error yang berlebihan sehingga respon sistem menjadi lebih terkontrol dan tidak mengalami hunting. Sistem mampu mencapai dan mempertahankan tegangan mendekati 110 V meskipun diberikan beban 35 W. Dengan demikian, parameter pada Trial 3 dinilai memberikan performa kontrol yang paling stabil dan mendekati karakteristik yang diharapkan.

- Pengujian Respon Step Load Trial 3



Gambar 4. 20 Hasil Percobaan Trial 3 Grafik Step Load

(Sumber : Pribadi)

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada **Gambar 4.20**, ketika beban ditambahkan terjadi penurunan tegangan sesaat hingga sekitar 90–95 V, kemudian respon kontrol PI menaikkan kembali tegangan dengan overshoot awal mencapai sekitar 135–140 V. Setelah fase transien tersebut, amplitudo osilasi semakin mengecil dan sistem mulai menunjukkan peredaman yang baik hingga akhirnya stabil di sekitar setpoint 110 V. Dibandingkan dengan Trial sebelumnya, respon pada Trial 3 menunjukkan karakteristik yang lebih stabil dan tidak mengalami osilasi berulang dalam waktu lama.

Ditinjau dari settling time, sistem mampu kembali masuk ke dalam batas toleransi sekitar $\pm 5\%$ dari setpoint (104,5–115,5 V) dalam waktu yang relatif

singkat setelah terjadi gangguan beban. Berdasarkan grafik, settling time diperkirakan berada pada kisaran beberapa detik setelah gangguan, dimana setelah itu tegangan tetap berada di sekitar setpoint tanpa keluar dari batas toleransi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi steady-state dengan baik. Dari sisi error, setelah kondisi tunak tercapai, tegangan berada di sekitar 108–112 V sehingga diperoleh steady-state error yang kecil, yaitu sekitar ± 2 V atau sekitar $\pm 1,8\%$.

Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan mendekati setpoint dengan akurasi yang baik. Selain itu, deviasi sesaat akibat gangguan juga lebih kecil dibandingkan Trial sebelumnya, sehingga performa sistem secara keseluruhan menjadi lebih stabil. Dengan demikian, kombinasi parameter K_p dan K_i pada Trial 3 dinilai optimal karena mampu menghasilkan respon yang cepat, memiliki peredaman yang baik, settling time yang singkat, serta steady-state error yang kecil dalam menghadapi perubahan beban