

BAB IV

ANALISA DAN PENGUJIAN

4.1 Hasil Pengujian Komponen

Berdasarkan hasil percobaan dan pengujian yang dilakukan selama proses pembuatan alat tugas akhir ini. Pada bab ini disusun untuk menunjukkan kinerja alat yang telah dibuat, baik dari segi performa setiap komponen yang digunakan maupun alur kerja sistem komponen. Pengujian telah dilakukan mulai dari kinerja dari komponen utama seperti mikrokontroller, sensor, driver, HMI dan juga catu daya yang hasilnya kemudian dibandingkan dengan spesifikasi aktualnya. Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem keseluruhan untuk memastikan setiap komponen berfungsi sesuai tujuan perancangan. Hasil pengujian ini juga menjadi dasar dalam proses perbaikan melalui metode trial and error, guna memperoleh performa alat yang optimal.

4.1.1 Pengujian SMPS 12V 5A Dengan Display LM2596

Pengujian catu daya ini dilakukan untuk mengecek kestabilan suplai sebelum sistem dijalankan ataupun dikendalikan. SMPS 12V 5A ini diukur pada kondisi tanpa beban dan juga pada kondisi menggunakan beban, kemudian pengujian dengan alat terkalibrasi yaitu multimeter disetel untuk sebagai bahan komparasi. Pengukuran ini dilakukan secara bertahap hingga 1.5A dengan pencatatan V_{in} , V_{out} Aktual, Arus output dan deviasi (%). Pengujian ini juga mencatat variabel pengujian pada input dan output tegangan dengan penggunaan potensiometer yang di set tetap tetapi dilakukan dalam interval 5 detik per satu data pengujian. Dan penggunaan dari komponen LM2596 ini pengujian komponen SMPS adalah untuk menjadi display yang nantinya akan dikomparasi dengan pembacaan dari multimeter untuk mendapatkan deviasi *error*.

Tabel 4. 1 Data Pengujian Catu Daya SMPS 12V 5A Dengan Multimeter Tanpa Beban

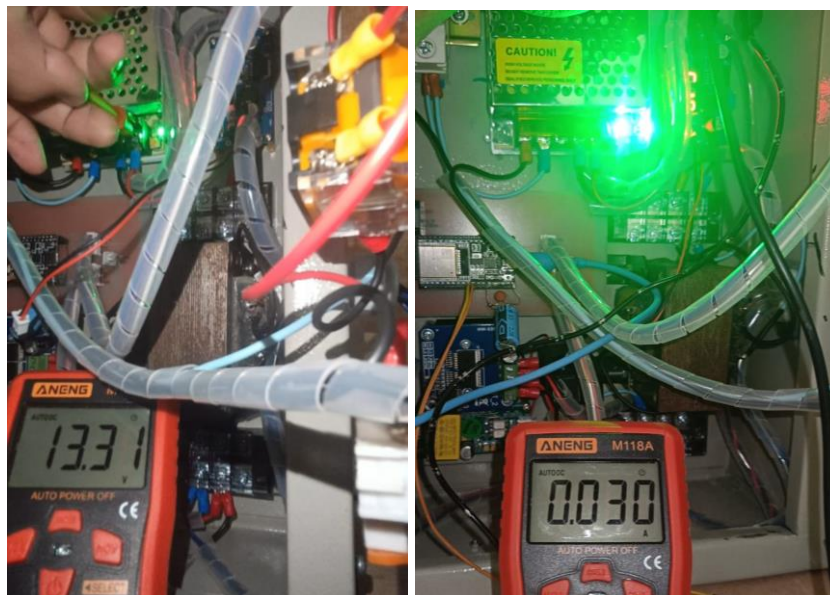
Pengujian	Vin AC (VAC)	Vout SMPS (VDC)	Vout LM2596 Display (VDC)	Arus Output SMPS (A)	Deviasi Vout (%)
1	235,9	13,3	13,27	0,03	-1%
2	235,1	13,3	13,27	0,03	-1%
3	234,5	13,3	13,27	0,03	-1%
4	235,0	13,3	13,3	0,03	0%

Tabel 4. 2 Data Pengujian Catu Daya SMPS 12V 5A Dengan Multimeter dengan Beban

Pengujian	Vin AC (VAC)	Vout SMPS (VDC)	Vout LM2596 Display (VDC)	Arus Output SMPS (A)	Deviasi Vout (%)
1	231,7	13,3	13,3	0,112	0%
2	235,8	13,3	13,3	0,114	0%
3	234,0	13,3	13,3	0,114	0%
4	235,8	13,3	13,3	0,115	0%

Pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2** ini ialah hasil data pengujian untuk variabel Vin SMPS, Vout SMPS, Vout LM2596 sebagai display. Input AC terhadap suplai daya menggunakan daya dari rumah dan didapat rentan antara 231-235VAC. Pada pengujian awal tanpa menggunakan beban dapat didapat output SMPS yaitu 13,3VDC, pada pengujian SMPS ini menggunakan daya tertinggi yang dapat diatur menggunakan potensiometer di bagian SMPS. Pengujian ini juga akan dilakukan terus menggunakan 13VDC agar jika ada kekurangan daya atau rugi rugi daya pada driver dapat ditolerir dengan set tegangan yang lebih tinggi. Adapun pengurangan tegangan kurang dari 1% pada SMPS dengan pembacaan display LM2596 dengan Multimeter dikarenakan adanya wiring penghantar dimana panjang kabel dapat dijadikan hambatan resistif. Pada pengujian dengan beban menggunakan ESP32 dan beberapa komponen pendukung lainnya seperti BTS7960, PZEM-004T dan HMI Nextion dengan penggunaan LM2596 juga. Dengan penambahan beban maka

arus akan lebih banyak yang mengalir karena penggunaan daya pada tiap komponen yang terhubung. Pada pengujian data arus didapat 0,03A pada **Gambar 4.1** dimana hal tersebut karena arus masih bekerja normal dengan tidak adanya beban yang memaksa arus lebih besar. Pada pengujian menggunakan beban tidak banyak yang berubah dalam variasi data yang didapat. Pada data tegangan dari step down LM2596 ini mengalami penurunan dikit dari data sebelumnya yaitu kurang dari 1% di beberapa data kecil. Data arus yang teruji naik hingga 0,11A dimana terjadi karena adanya beban dari ESP32 DevKitC V4 dan beberapa komponen seperti Sensor PZEM-004T, driver BTS7960 dan HMI Nextion yang input daya terhubung dengan mikrokontroler. Dalam keadaan ini masih termasuk belum maksimal dalam penggunaan daya karena HMI dan komponen yang terintegrasi ESP32 belum berjalan secara penuh atau masih dalam keadaan tanpa menerima atau mengirim data pada ESP32.



(a)

(b)

Gambar 4.1 Pengukuran Tegangan (a) dan Pengukuran Arus (b) Output SMPS 12V 5A

4.1.2 Pengujian PZEM-004T 100A

Pengujian sensor PZEM-004T bertujuan untuk menilai akurasi pengukuran tegangan, arus, frekuensi, dan daya yang nantinya menjadi umpan balik kontrol. Sensor dipasang pada sisi 220 VAC setelah trafo step-up, kemudian nilainya dibandingkan dengan alat ukur rujukan pada beberapa tingkat beban resistif (5–10

Watt). Interval pembacaan juga diukur untuk memverifikasi latensi 300 ms, yang akan menentukan periode loop PID. Variabel data yang di cek menggunakan sensor dan menggunakan multimeter akan dihitung dari perbandingan tegangan, arus, daya dan frekuensi.

Tabel 4. 3 Data Pengujian Sensor PZEM-004T Tanpa Beban

Pengujian	Vout PZEM (V)	V ref (V)	Arus PZEM (A)	I ref (A)	Error Voltase (%)	Error Arus(%)	Kecepatan Putar (RPM)
1	221,0	222,8	0,09	0,1	-0,81	-10	1490
2	221,5	223	0,09	0,1	-0,7	-10	1490
3	219,9	222,7	0,09	0,1	-1,25	-10	1490
4	221,7	223,3	0,09	0,1	-0,72	-10	1490
5	221,9	223,4	0,09	0,1	-0,67	-10	1490

Tabel 4. 4 Data Pengujian Sensor PZEM-004T Dengan Beban

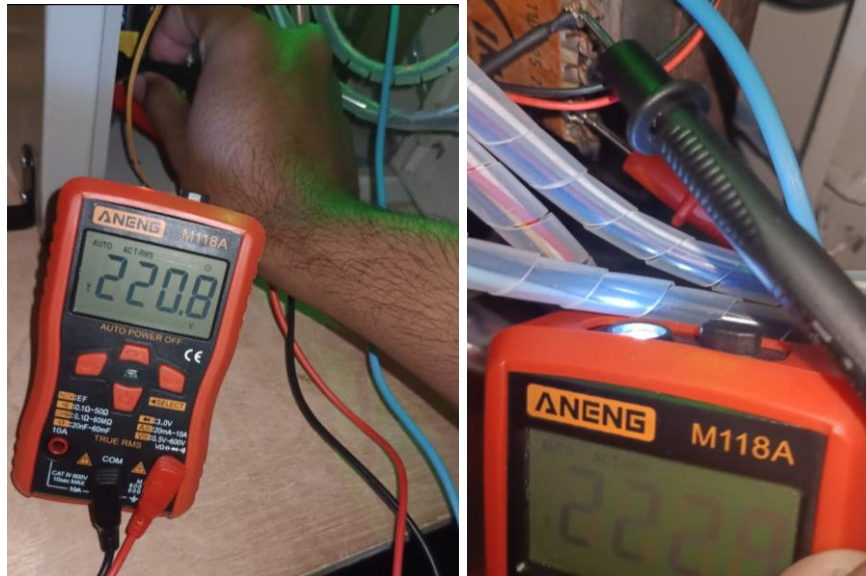
Pengujian	Vout PZEM (V)	V ref (V)	Arus PZEM (A)	I ref (A)	Error Voltase (%)	Error Arus(%)	Kecepatan Putar (RPM)
1	215,6	214,6	0,14	0,16	-0,47	-12,5	1490
2	215,1	214,4	0,14	0,16	-0,33	-12,5	1490
3	215,1	214,4	0,14	0,16	-0,33	-12,5	1490
4	215,5	214,9	0,14	0,16	-0,28	-12,5	1490
5	215,4	215	0,14	0,16	-0,19	-12,5	1490

Pada pengujian komponen utama yang menjadi feedback sistem ini data dapat dilihat pada **Tabel 4.3** dan **Tabel 4.4**. Pada pengujian PZEM-004T ini dilakukan untuk melihat error dengan mengkomparasi data yang dilihat pada monitor laptop ataupun dari HMI Nextion yang sudah diintegrasikan dengan multimeter dan juga clampmeter digital yang sudah terkalibrasi. Dari komparasi yang didapat akan bisa disimpulkan nilai error yang didapat dalam pembacaan, pembacaan ini melibatkan tegangan, arus dan kecepatan dari putaran mesin. Pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan beban dan tidak menggunakan beban. V ref dan I ref didapat

dari mengukur pada komponen alternator dibagian outputnya dengan menggunakan multimeter dan clampmeter yang dapat dilihat pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**. Data tanpa beban didapat hasil dari pembacaan tegangan PZEM-004T berbeda dengan hasil pembacaan menggunakan multimeter, error yang didapat pada tabel merupakan selisih perbedaan yang dijadikan persentase dan hasilnya ialah rentang error 0,7-1,25% dan akurasi yang terdapat pada datasheet komponen sebesar $\pm 0,5\%$ dimana dengan angka tersebut masih bisa dioleransi karena pada kodingan yang ada pada pembacaan diberikan filter agar pembacaan tidak terlalu osilasi. Pada pembacaan ampere trafo bagian output menggunakan clampmeter. Pada data arus yang dibaca oleh PZEM-004T memiliki error yang cukup besar dari pembacaan, hal ini dikarenakan clamp meter hanya menampilkan satu 0 dibelakang koma yang menjadikan susah dalam penentuan secara detail. Pada pembacaan dengan menggunakan beban tidak bisa dikomparasi dengan percobaan saat tidak menggunakan beban karena pada sistem ini data masih dalam keadaan terjadi osilasi walaupun tidak lebih dari 5%. Dengan adanya masalah dalam tingkat akurasi pengukuran sensor PZEM-004T ini masih bagus dalam hal performa.



Gambar 4. 2 Peugujian Sensor PZEM-004T Pada Tampilan HMI Nextion



Gambar 4. 3 Data Pada Input PZEM-004T Dan Data Pembacaan Pada Output Trafo dengan Multimeter

4.1.3 Pengujian BTS7960

Pengujian BTS7960 ini pada sinyal PWM dari ESP32. Pengujian melihat keterpautan duty terhadap tegangan atau arus ke brush serta perilaku adanya perubahan termal saat beban mengalir dan panas juga dapat membuat kualitas driver menurun. Driver dinyatakan memadai apabila menghasilkan keluaran yang proporsional ataupun linear antara PWM dan Oupput yang didapatkan, tidak menunjukkan gejala osilasi abnormal, dan suhu tetap dalam batas aman.

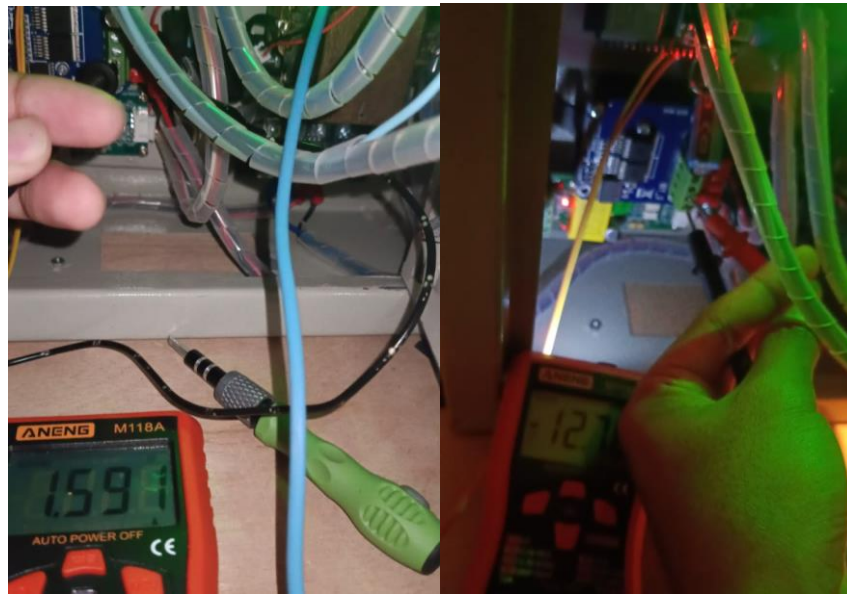
Tabel 4. 5 Data Pengujian BTS7960 Tanpa Beban

No	Duty Cycle (%)	PWM	Vin BTS7960 (V)	Vout BTS7960 (V)	Vout Ref (V)	Arus Output BTS7960 (A)	Error Vout (%)
1	4	10	13,31	0,5	0,52	0,2	-5
2	11,75	30	13,31	1,4	1,5	0,57	-5
3	19,6	50	13,31	2,4	2,6	0,95	-5
4	27,45	70	13,31	3,46	3,65	1,3	-5
5	35,30	90	13,31	4,45	4,7	1,72	-5
6	39	100	13,31	4,95	5,219	1,915	-5

Tabel 4. 6 Data Pengujian BTS7960 dengan Beban

No	Duty Cycle (%)	PWM	Vin BTS7960 (V)	Vout BTS7960 (V)	Vout Ref (V)	Arus Output BTS7960 (A)	Error Vout (%)
1	7,8	20	13,31	1	1	0,328	0
2	21,5	55	13,31	2,76	2,85	0,902	-3
3	35,3	90	13,31	4,5	4,7	1,47	-3
4	49	125	13,31	6,2	6,5	2	-3
5	65,4	167	13,31	8,3	8,7	2,73	-3
6	81,9	209	13,31	10,4	10,91	3,42	-3
7	100	255	13,31	12,78	13,31	4,183	-3

Pada pengujian driver BTS7960 ini dilakukan menggunakan beban dan tidak menggunakan beban. Beban yang dimaksud ialah brush rotor alternator yang berupa lilitan atau kumparan tembaga yang nantinya akan dijadikan magnet. Pada pengujian ini menggunakan multimeter untuk pembacaan tegangan dan arus seperti pada **Gambar 4.4**. Vref pada data tabel merupakan perhitungan secara manual dengan penggunaan pwm dengan data Vin pada BTS7960 yang didapat. Terdapat hasil error pada pembacaan output driver BTS7960 dengan Vref, dikarenakan output yang masih dalam kendali sistem yang membuat ada osilasi kecil dan faktor lain yang menyebabkan error sedikit lebih besar. Hal tersebut karena toleransi akurasi dari driver BTS7960 itu sendiri karena penggunaan yang lama dapat menurunkan akurasi. Pada pengujian dengan beban terjadi lonjakan arus pada driver hingga 4,1A untuk mendapatkan nilai maksimal. Pengujian ini masih tidak menunjukkan abnormal pada komponen, dengan suhu yang masih terjaga dan hasil dari output yang masih baik kisaran error $\pm 3-5\%$.



(a)

(b)

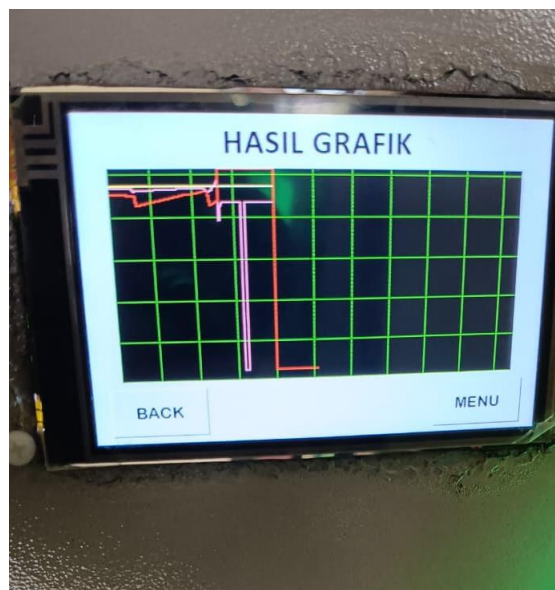
Gambar 4. 4 Pembacaan Arus Pada Output BTS7960 Tanpa Menggunakan Beban (a) dan Tegangan Output BTS7960 Tanpa Menggunakan Beban

4.1.4 Pengujian Nextion NX4832F035

Pengujian HMI ini berfokus pada pembacaan dan keandalan komunikasi. Perubahan halaman, pembaruan teks sensor, dan penggambaran waveform dievaluasi dari latensi dan error. HMI dinyatakan baik bila pembaruan terjadi dalam $\leq 0.5\text{--}0.8$ s dan tidak ditemukan data yang dikirim rusak. Pada sistem yang sudah dibuat juga ada filter yang digunakan dan memungkinkan data yang error juga akan di satukan dan dijadikan data yang valid. Pada pengujian komponen ini dicek untuk penggunaan waveform dan variabel data sensor apakah sinkron dan grafik pada monitoring ini digunakan sebagai acuan evaluasi bentuk untuk menyeting nilai parameter PID jika diperlukan data yang lebih baik. Dengan tampilnya nilai pada setiap tool yang ada di HMI Nextion dapat disimpulkan komponen ini dapat bekerja dengan baik dilanjut dengan update data yang dapat dilihat contohnya pada **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6**. Komparasi pada pengujian ini dilihat dengan hasil dari serial monitor, dimana seharusnya sama dengan apa yang ada pada di serial monitor. Dan untuk pengiriman antara mikro dengan HMI Nextion sudah sesuai.



Gambar 4. 5 Pengujian Dengan Penggunaan Button Untuk Mengganti Halaman Pada HMI Nextion



Gambar 4. 6 Pengujian Update Input Data Pada Grafik Waveform HMI Nextion

4.1.5 Pengujian Alternator dan Trafo Non-CT 5A

Karakterisasi plant dilakukan untuk memahami hubungan duty PWM ke arus eksitasi (I_f) dengan V_{out} sebelum kontrol PID diaktifkan. Alternator digerakkan pada rpm tetap pada 1490Rpm, kemudian tegangan keluaran setelah trafo step-up diukur pada kondisi tanpa beban dan berbeban 0-30 W langsung. Data ini menjadi dasar penetapan *range duty* efektif, estimasi *drop* akibat beban, dan batas aman (0V-260 V).

Tabel 4. 7 Data Pengujian Alternator dan Trafo Non-CT 5A Tanpa Beban (0 watt)

Pengujian	Duty Cycle (%)	PWM	Eksitasi (SMP S)	Vout Alternator (V)	Arus Alternator (A)	Vout Trafo (V)	Arus Trafo (A)	Kecapatan Putar (RPM)
1	100	255	13V	10,3	2,6	244,2	0,1	1490
2	100	255	14,5	10,44	2,6	250,4	0,1	1490

Tabel 4. 8 Data Pengujian Alternator dan Trafo Non-CT 5A dengan Beban

Pengujian	Duty Cycle (%)	PWM	Beban (Watt)	Vout Alternator (V)	Arus Alternator (A)	Arus Trafo (A)	Kecapatan Putar (RPM)
1	100	255	0	10,6	2,6	0,2	1490
2	100	255	5	10,29	2,96	0,2	1490
3	100	255	10	9,96	3,2	0,2	1490
4	100	255	20	9,59	4,6	0,2	1490
5	100	255	25	9,47	5,5	0,2	1490
6	100	255	30	9,29	6,4	0,2	1490

Pengujian pada alternator dan trafo ini dilakukan secara bersamaan karena dari output alternator agar mendapatkan output 220VAC harus menggunakan Trafo Non-CT. Dari **Tabel 4.7** dan **Tabel 4.8** diketahui bahwa pengujian ini melibatkan data tegangan dan arus dari alternator juga Trafo, pengujian ini dilakukan dengan sistem maksimal pada keadaan diberi beban dan tanpa beban dengan PWM 100 hingga 192 yang menunjukkan tegangan yang dibaca sudah sesuai setpoint 220VAC. Pada saat Vout sistem sudah mencapai 220VAC tanpa beban seperti pada **Gambar 4.7** lalu data arus yang didapat yaitu 2,6-6,4A dan berbeda saat diberi beban, arus naik hingga 3,3A yang dapat dilihat pada **Gambar 4.8**. Data linear tersebut dapat menyimpulkan kehandalan dari komponen alternator dan trafo. Pada pengujian menggunakan beban 0 hingga 30 Watt, sistem mengalami stuck karena

penggunaan beban yang membuat maksimal PWM dan hal tersebut terjadi karena setpoint belum tercapai. Pada hasil yang didapat menggunakan sensor memiliki hasil yang sedikit berbeda dengan yang dihiutng secara manual. Pengujian perhitungan secara manual bertujuan untuk memvalidasi dari nilai variabel yang muncul karena sensor. Berikut persamaan rumus dari tegangan output dari alternator dan tegangan eksitasi yang disajikan pada rumus 2.2 dan 2.4:

Mencari nilai frekuensi dan jumlah pole pada alternator :

$$P = \frac{120 \cdot f}{Nr}$$

$$P = \frac{120 \cdot 50}{1490} = \frac{6000}{1490} = 4,02 = 4 \text{ Pole}$$

Dan

$$fe = \frac{1490 \cdot 4}{120} = 49,7 = 50Hz$$

Berikut untuk mencari nilai dari konstanta mesin dan juga nilai kecepatan sudut daripada alternator. Diketahui pada alternator memiliki putaran rotor di 1490 (RPM), dan tegangan output yang terukur 10,6 VAC.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot Nr}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1490}{60} = 155,95 \text{ Rad/s}$$

$$V_{ph} = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

$$K\Phi = \frac{V_{ph}}{\omega} = \frac{10,6}{155,95} = 0,0679 \text{ V}$$

Jadi hasil dari konstanta mesin ialah 0,0679 V. Pada hasil pengujian data eksitasi dapat divalidasi dengan penggunaan output alternator dan juga konstanta mesin yang menjadi variabel pendukung pada rumus persamaan. Berikut mencari nilai dari tegangan eksitasi yang dipakai pada alternator .

Diketahui :

Tegangan Terminal (V_t) = 10,4 VAC

Arus Output Tanpa Beban (I_a) = 2,6A

Faktor Daya ($\cos\phi$) = 0,9 dan $\sin\phi = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,4357$

Resistansi Statot (R_a) = 0,5 Ohm

Reaktansi Lilitan (X_s) = 2,21 Ohm

Untuk Mencari Tegangan eksitasi dapat menggunakan persamaan rumus berikut :

$$Ef^2 = V_{ph} + I_a (R_a + X_s)$$

$$Ef = \sqrt{(V_{ph} \cos\phi + I_a \cdot R_a)^2 + (V_{ph} \sin\phi + I_a \cdot X_s)^2}$$

$$Ef = \sqrt{(10,4 \cdot 0,9 + 2,6 \cdot 0,5)^2 + (10,4 \cdot 0,4359 + 2,6 \cdot 2,21)^2}$$

$$Ef = \sqrt{(10,616)^2 + (10,4096)^2}$$

$$Ef = \sqrt{220,93} = 14,8 \text{ VDC}$$

Hasil dari ekstitasi yang diberikan berbeda sedikit dengan pengujian dimana hasil yang didapatkan pada pengujian langsung menggunakan tegangan eksitasi 14,5 VDC dan memberikaan hasil tegangan output alternator 10,44 VAC dengan arus 2,6 A. Hasil yang didapatkan dari perhiutngan manual memiliki selisih dalam perhitungan sebanyak 0,3VDC. Pada perhitungannya memiliki hasil yang berbeda dapat dikarenakan ada rugi-rugi daya pada proses aktualnya. Berikut uji coba yang dilakukan terlihat pada **Gambar 4.7** :



Gambar 4. 7 Data Pembacaan Tegangan Pada Output Alternator 1 Fasa Tanpa Input Beban dan Pembacaan Pada Output Tarfo Step Up



Gambar 4. 8 Pengujian Data Arus Pada Output Alternator Saat Diberi Beban 10Watt

4.2 Hasil Pengujian Sistem Tanpa Kontrol PID

Pada bab ini dilakukan pengujian pada keseluruhan sistem yang sudah dirakit dan uji komponen sebelumnya, pengujian ini memastikan untuk semua fungsi dari software dan hardware dapat terintegrasi tanpa adanya masalah. Pengujian ini bertujuan untuk menilai performa sistem keseluruhan tanpa integrasi menggunakan kontrol PID, dimana dalam pengujian ini menggunakan mode manual dengan menginputkan nilai set PWM 100. Pengujian ini dilakukan secara *open-loop* dengan tahapan percobaan menggunakan beban lampu pijar sebagai percobaan perubahan variabel sistem. Pada pengujian ini variabel yang di monitoring yaitu tegangan, arus, dan PWM dengan menggunakan data dari Node-Red untuk data realtime dan grafik juga menggunakan data display dari HMI Nextion.

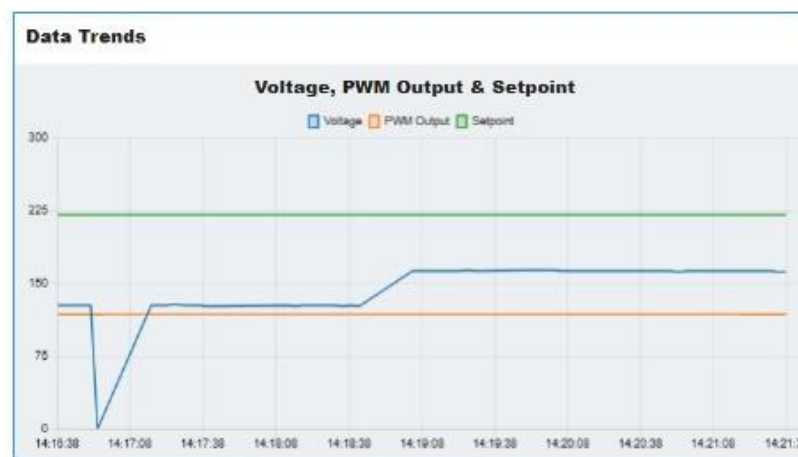
4.2.1 Pengujian Sistem Tanpa Beban

Pada pengujian ini menggunakan sistem open loop yang menggunakan mode manual dimana set parameter PWM diatur pada 100 dan dengan kecepatan putaran yang sama sekitar 1490 RPM. Pada pengujian awal sistem open loop ini tanpa menggunakan beban. Berikut hasil data pada **Tabel 4.9** yang didapat pada pengujian sistem tidak menggunakan kontrol dan tanpa beban:

Tabel 4. 9 Data Pengujian Tanpa Sistem Kontrol dan Tanpa Beban

Waktu	Voltage	PWM
14:10:02	161,9	100
14:10:05	162,0	100
14:10:22	161,7	100
14:10:26	161,8	100
14:10:29	161,8	100
14:10:32	162,3	100
14:10:36	162,4	100
14:10:39	162	100
14:10:42	162,1	100
14:10:45	162	100
14:10:49	161,9	100
14:10:52	162,1	100
14:11:14	162,7	100
14:11:17	162,6	100
14:11:20	162,7	100
14:11:23	163	100
14:11:27	163,1	100
14:11:30	162,7	100
14:11:33	162,7	100
14:11:36	0	100
14:11:40	162,8	100
14:11:43	162,8	100
14:12:05	162,5	100
14:12:12	163	100
14:12:15	162,9	100
14:12:21	163,2	100
14:12:25	163,7	100
14:12:28	163,4	100
14:12:31	163,2	100

Pada data tabel yang diatas tegangan keluaran pada saat tanpa menggunakan beban menetap di 162.3 V untuk rata ratanya. Pengujian tanpa sistem kontrol terlihat stabil karena eksitas dan putaran *prime mover* stabil tanpa adanya fluktuasi pada sistem eksitasi. Pada pengujian ini didapat data Ripple tegangan sekitar 6.2 V, data ini didapat dari data maksimal dan data minimal tegangan pada saat tanpa menggunakan beban. Pada pengujian ini tidak ada data yang menuju setpoint atau titik tegangan yang diinginkan karena sistem *open-loop* dan tegangan konstan pada 162 V. Tanpa sistem kontrol *close-loop*, nilai PWM yang diberikan tidak akan cukup untuk tegangan output mencapai *setpoint*. Berikut data display dari grafik Node-Red pada **Gambar 4.9** .



Gambar 4. 9 Grafik Sistem Tanpa Kontrol dan Tanpa Beban

4.2.2 Pengujian Sistem Menggunakan Beban

Pada pengujian ini menggunakan sistem open loop yang menggunakan PWM konstan 100 dengan mode manual dan dengan kecepatan putaran yang sama sekitar 1490 RPM seperti percobaan tanpa menggunakan beban. Pada pengujian awal sistem open loop ini tanpa menggunakan beban. Berikut hasil data pada **Tabel 4.10** yang didapat pada pengujian sistem tidak menggunakan kontrol dan dengan beban:

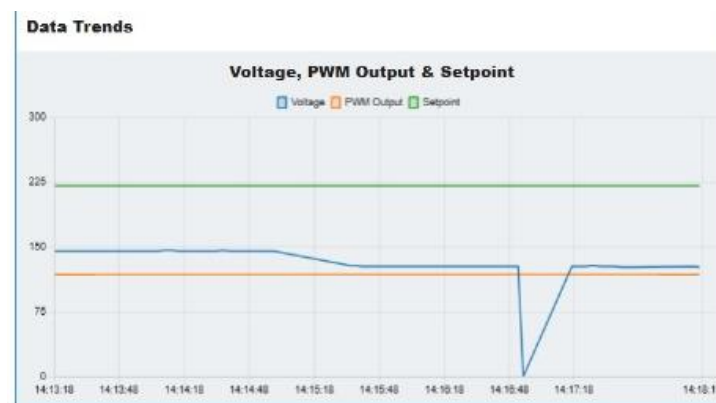
Tabel 4. 10 Data Pengujian Tanpa Sistem Kontrol dan Dengan Beban

Waktu	Voltage	PWM
14:12:31	163,2	100
14:12:57	145,1	100
14:12:58	144,9	100

Waktu	Voltage	PWM
14:13:02	144,9	100
14:13:05	144,8	100
14:13:09	144,9	100
14:13:11	144,9	100
14:13:15	144,7	100
14:13:18	144,5	100
14:13:21	144,5	100
14:13:24	144,6	100
14:13:46	144,7	100
14:13:49	145,1	100
14:13:52	145	100
14:13:55	145	100
14:13:59	145	100
14:14:02	145	100
14:14:06	145,3	100
14:14:08	145,4	100
14:14:12	145,4	100
14:14:15	145,2	100
14:14:32	145,2	100
14:14:35	145,6	100
14:14:39	145,3	100
14:14:42	145,1	100
14:14:46	145,2	100
14:14:49	145,3	100
14:14:52	145,1	100
14:14:56	145	100
14:14:59	144,8	100
14:15:34	127,8	100
14:15:37	127,8	100
14:15:39	127,7	100
14:15:43	127,4	100

Waktu	Voltage	PWM
14:15:46	127,3	100
14:15:50	127,5	100
14:15:52	127,3	100
14:15:56	127,3	100

Pada data tabel diatas terlihat pengurangan tegangan atau drop voltage pada saat dibebani menggunakan lampu pijar 5 watt pada waktu 14:12:57. Tegangan turun dari sebelumnya 162,54 V ke 144,78 V dimana terjadi pengurangan 17,6 V dengan penggunaan beban 5 watt. Ada penggunaan beban 5 watt kedua didapat data tegangan terbaca 127,43 V dengan pengurangan sama seperti sebelumnya yaitu 17,59 V. Pada data yang ada pada tabel diatas tidak terlihat adanya pemulihan ke *setpoint* karena tidak ada sistem koreksi error dari sensor yang terbaca. Dari data grafik **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.9** dapat disimpulkan sistem yang di uji yaitu sistem *open-loop*. Pengujian ini bertujuan untuk data komparasi dari pada penggunaan nantinya menggunakan sistem terkontrol menggunakan metode PID. Berikut data display dari grafik Node-Red pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4. 10 Grafik Sistem Tanpa Kontrol dan Dengan Beban

4.3 Hasil Pengujian Sistem Kontrol PID

Pada bab ini dilakukan pengujian pada keseluruhan sistem yang sudah dirakit dan uji komponen sebelumnya, pengujian ini memastikan untuk semua fungsi dari

software dan hardware dapat terintegrasi tanpa adanya masalah. Pengujian ini bertujuan untuk menilai performa sistem keseluruhan pada integrasi metode PID beserta filter yang dipakai pada sistem. Tahap pertama untuk memastikan sebelum menggunakan metode PID Ziegler Nichols dan Self-Tuning ialah mengecek linearitas pada keluaran tiap komponen seperti pada sistem eksitasi hingga output dari alternator maupun trafo. Pengujian ini menggunakan mode otomatis dengan setting parameter setpoint di 220V agar sistem yang digunakan menjadi *close loop*.

4.3.1 Pengujian Dengan Parameter PID Ziegler Nichols

Pengujian ini menjelaskan proses memperoleh parameter awal PID menggunakan metode Ziegler–Nichols (Ultimate Gain) pada kondisi operasi tanpa beban untuk melihat proses dinamika murni plant sistem. Prosedurnya integral dan derivatif dimatikan ($K_i=0$, $K_d=0$), kemudian K_p dinaikkan bertahap sampai osilasi terlihat pada V_{out} . Nilai K_u ditetapkan sama dengan K_p saat osilasi pada sistem atau pada saat menemukan grafik yang berosilasi secara terus menerus. Nilai dari P_u dihitung dari jarak puncak-ke-puncak dikalikan periode sampling PZEM-004T (0,3 s/sampel). Selanjutnya parameter diskrit dihitung secara keseluruhan dapat dilihat pada **Tabel 2.1** untuk mencari nilai K_p , T_i dan T_d . Hasil tuning untuk tanpa beban dan dengan beban disimpan sebagai dua set data, lalu dipakai pada uji validasi berikutnya. Selama uji, deadband sementara dinonaktifkan agar osilasi muncul jelas, dan batas $V_{out} \leq 260$ V tetap aktif.



Gambar 4. 11 Grafik Tegangan Uji Coba Metode Osilasi

```

92  const int MAX_STAGNANT_COUNT = 10;
93
94  // === PID PARAMETERS ===
95  float setpoint = 220.0;
96  float Kp = 1.0;
97  float Ki = 0;
98  float Kd = 0;
99
100 float integral_error = 0;
101 float last_error = 0;
102 unsigned long last_time = 0;
103 const long SAMPLING_TIME = 300;
104

```

Gambar 4. 12 Data Nilai Kp Pada Pengujian Osilasi

Pada pengujian untuk mencari nilai Kp, Ki dan Kd butuh nilai Ku dan Pu. Pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12** didapat dengan penggunaan Kp sebesar 1 dapat membuat osilasi pada sistem. Osilasi yang dicari pada pengujian ini yaitu osilasi yang terjadi berulang ulang dan setelah itu *peak-peak* terlihat maka dihitung waktu puncak ke puncak lainnya dengan satuan waktu yaitu detik (s). pada gambar diatas didapat puncak 1 di data ke-534 dan puncak 2 di data ke-549. Pada pengujian terebut didapat sampling time di set pada 100ms dan selisih dari data tersebut dikalikan agar terlihat waktunya berapa lama dan setelah itu dijadikan menjadi satuan detik (s) dari milidetik(ms). Data yang didapat pada percobaan tersebut adalah Ku bernilai 1 dan Pu bernilai 1,5. Berikut data yang dapat menjadi bahan mencari variabel integral dan derivative pada **Tabel 4.11** berikut :

Tabel 4. 11 Data Tuning Formula Metode PID Ziegler Nichlos dari Data Pengujian

Tipe Kontroller	K_p	T_i	T_d
P	0,5	∞	0
PI	0,45	1,245	0
PID	0,6	0,375	0,09375

Untuk mencari variabel dari gain integral dan derivative dapat dicari jika sudah mendapatkan nilai dari Kp, Ti dan Td. Berikut perhitungan untuk mencari Kp, Ki dan Kd dari variabel yang sudah didapat sebelumnya yang ada pada rumus (2.5) hingga (2.7) :

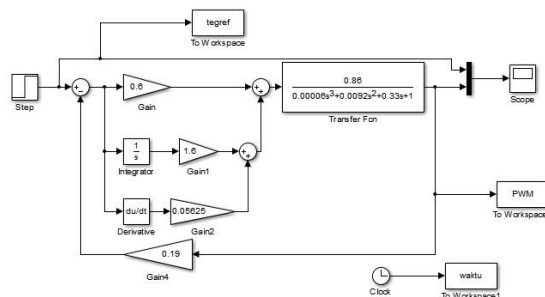
$$Kp = 0,6 \quad Ku = 0,6$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = 1,6$$

$$Kd = \frac{Kp}{Td} = 0,05625$$

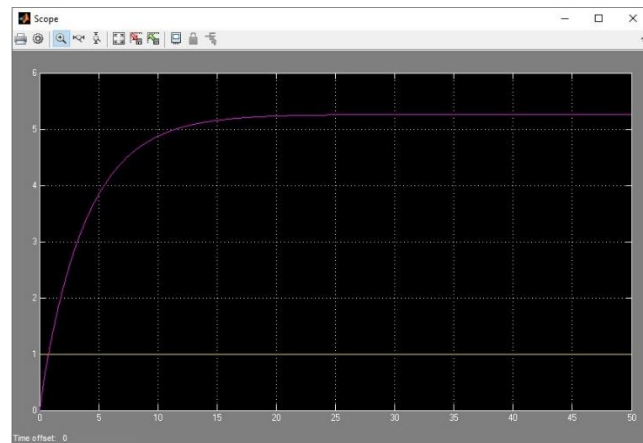
4.3.1.1 Pengujian Hasil Parameter PID pada Matlab

Pada pengujian ini dilakukan sebagai validasi awal terhadap parameter kontroler PID yang diperoleh dari metode tuning Ziegler-Nichols. Pengujian ini dilakukan secara simulasi menggunakan *software* MATLAB pada simulink untuk mendapatkan gambaran mengenai performa sistem sebelum diimplementasikan pada perangkat keras. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memvalidasi parameter yang didapat apakah mampu beroperasi dengan model matematis (plant) dari alternator dengan stabil dan untuk menganalisis karakteristik respon transien yang dihasilkannya.



Gambar 4. 13 Blok PID Pada Simulasi Simulink MATLAB

Model simulasi yang dirancang di Simulink, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.13**, terdiri dari blok Transfer Function yang merepresentasikan model matematis dari sistem alternator. Kontroler PID diimplementasikan dengan parameter yang telah dihitung menggunakan metode Ziegler-Nichols, yaitu $Kp = 0.6$, $Ki = 1.6$, dan $Kd = 0.05625$. Sistem diberikan sebuah masukan berupa step input untuk mensimulasikan sinyal referensi atau setpoint secara tiba-tiba. Keluaran dari sistem, yang dalam hal ini merepresentasikan tegangan alternator, diamati menggunakan blok Scope untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 4. 14 Hasil Grafik Pada Scope Simulasi Simulink

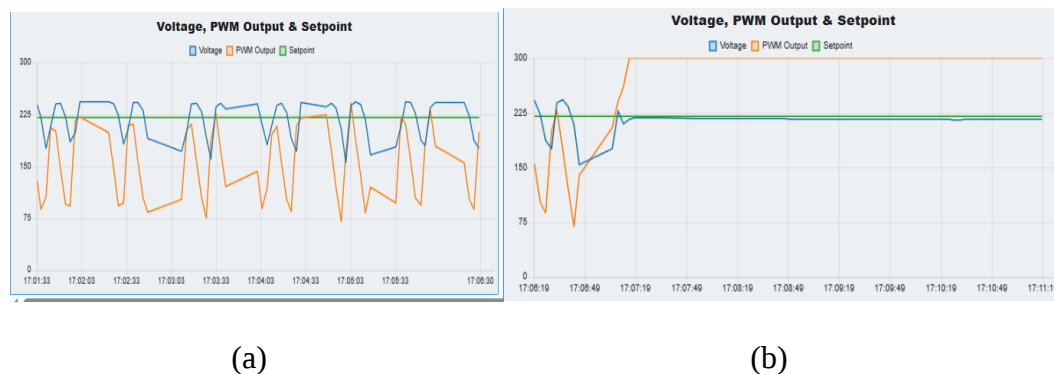
Hasil dari simulasi respon sistem terhadap step input dapat dilihat pada **Gambar 4.14**. Dari grafik dapat dianalisis beberapa karakteristik sistem menunjukkan respon yang sangat stabil, ditandai dengan tidak adanya overshoot yang signifikan. Respon sistem naik secara mulus menuju nilai tunaknya (steady-state) di sekitar 5.2 tanpa adanya lonjakan yang berarti. Ketiadaan overshoot ini merupakan sebuah hasil yang positif dan lonjakan tegangan yang tinggi dapat membahayakan peralatan. Dari hasil pada grafik dapat diamati bahwa sistem memiliki rise time (waktu naik) dan settling time (waktu tunak) yang relatif lambat. Dibutuhkan waktu sekitar 20 hingga 25 detik bagi sistem untuk sepenuhnya stabil pada nilai targetnya.

Analisis pada grafik menunjukkan bahwa parameter PID yang didapat dari metode Ziegler-Nichols dengan model ini cenderung menghasilkan respon yang lebih mengutamakan stabilitas daripada kecepatan. Respon yang terlalu teredam (overdamped) ini meskipun aman, tetapi kurang ideal untuk aplikasi nyata pada alternator yang membutuhkan kemampuan untuk merespon perubahan beban secara cepat. Kinerja yang lebih lambat ini dapat menyebabkan tegangan turun (voltage drop) untuk waktu yang lebih lama saat beban listrik tiba-tiba ditambahkan. Oleh karena itu, simulasi ini memberikan kesimpulan awal bahwa meskipun parameter PID dari Ziegler-Nichols berhasil mengendalikan sistem secara stabil, diperlukan pengujian lebih lanjut pada perangkat keras dan kemungkinan penyesuaian (fine-tuning) untuk meningkatkan kecepatan respon

sistem agar lebih optimal saat diimplementasikan. Simulasi ini menjadi dasar perbandingan yang krusial untuk pengujian-pengujian selanjutnya.

4.3.1.2 Pengujian Step Load PID Ziegler Nichols

Pada bab ini pengujian dilanjutkan pada perangkat keras untuk mengamati performa aktual kontroler PID. Pengujian ini merupakan uji pembebanan tiba-tiba (step load test), yang dirancang untuk mengevaluasi kemampuan sistem kontrol dengan parameter Ziegler-Nichols dalam memproses error sistem. Gangguan diberikan dengan menyalakan sebuah beban lampu pijar 10 Watt secara tiba-tiba. Data respon sistem, termasuk tegangan, keluaran PWM, dan setpoint, dipantau dan dicatat secara real-time melalui dashboard IoT Node-RED untuk analisis yang presisi.



Gambar 4. 15 Data Grafik Sebelum (a) dan Sesudah (b) Diberi Step Load Pada Dashboard Node-Red

Hasil pengujian step load disajikan pada **Gambar 4.15** bagian **(b)**, yang menampilkan grafik data dari dashboard Node-RED. Berdasarkan analisis data CSV yang terekam, sebelum beban diberikan, sistem berjalan dalam kondisi yang tidak steady-state atau tunak, di mana tegangan keluaran (garis biru) tidak stabil pada $\pm 5\%$ dari 220V atau sesuai dengan setpoint (garis hijau), dengan nilai keluaran PWM (garis oranye) yang berfluktuasi hingga 75. Pada saat beban 10 Watt diaktifkan, terjadi gangguan (disturbance) yang menyebabkan penurunan tegangan (voltage drop) secara drastis hingga mencapai titik terendah di 182.5V. Merespon error yang besar ini, kontroler PID secara sigap dan cepat mengambil tindakan korektif.

Tabel 4. 12 Data Pengujian Dengan PID Ziegler-Nichols Tanpa Beban

Waktu	Tegangan (V)	PWM
16:43:13	0	100
16:43:16	0	100
16:43:19	0	100
16:43:21	221.8	205
16:43:23	227.9	230
16:43:26	230.6	202
16:43:29	229.4	162
16:43:32	224.5	127
16:43:36	209.5	87
16:43:39	183.2	115
16:43:42	197.3	155
16:43:45	234.4	180
16:43:49	240.7	140
16:44:08	240.7	145
16:44:15	233.4	105
16:44:15	232.3	100
16:44:20	196.9	71
16:44:22	168.9	116
16:44:25	221.5	176
16:44:28	240.8	166
16:44:32	240.1	126
16:44:35	229.4	91
16:44:54	230.7	90
16:44:58	187.7	76
16:45:01	164.2	141
16:45:04	232.1	181
16:45:09	239.2	168
16:45:12	239.3	123
16:45:15	225.9	78

Analisis mendalam pada respon sistem menunjukkan bahwa kontroler PID berfungsi dengan baik tetapi belum mencapai nilai data $\pm 5\%$ toleransi dari setpoint 220V terlihat pada **Tabel 4.12**. Kontroler segera memerintahkan kenaikan arus eksitasi, yang tercermin pada lonjakan nilai keluaran PWM secara cepat dan agresif. Nilai PWM meningkat hingga mencapai batas maksimumnya, yaitu 255, dan bertahan selama beban aktif. Fenomena ini dikenal sebagai saturasi PWM. Akibatnya, tegangan sistem berhasil pulih dari penurunan drastis, namun tidak kembali ke setpoint 220V, melainkan stabil pada kondisi tunak baru di sekitar 215.7V. Adanya selisih sekitar 4.3V ini merupakan kesalahan kondisi tunak (*steady-state error*).

Saturasi PWM pada nilai 255 dikarenakan kontroler telah mencapai 100%, namun daya yang dihasilkan oleh alternator tidak mencukupi untuk mempertahankan tegangan 220V sambil menyuplai daya ke beban 10 Watt. Pengujian step load ini tidak membuktikan bahwa parameter Ziegler-Nichols dengan metode osilasi menghasilkan respon yang stabil. Pada data tabel dengan grafik yang berosilasi berlebih dengan hasil 17% drop tegangan menjawab bahwa parameter tuning Ziegler-Nichols kurang cocok pada sistem ini.

4.3.2 Pengujian Penentuan Parameter PID Self Tuning

Pengujian ini mendokumentasikan algoritma *self-tuning* dengan melihat ripple grafik dan pengujian di beberapa bentuk parameter yang berbeda. Pada pengujian ini diawali dengan menambah dan mengurangi nilai parameter sebelumnya. Pada pengujian ini sama dengan pengujian menggunakan metode ZN dimana sama sama menggunakan beban lamu untuk melihat performa dari sistem. Percobaan masih dilakuakn secara sama atau dengan kata lain pada pengujian ini menggunakan baseline data dari pengujian menggunakan metode ZN.

Untuk mencari nilai dari K_u dan P_u bisa menggunakan data dari sebelumnya atau menggunakan data yang di uji untuk validasi data pada pengujian sebelumnya. Setelah mendapatkan nilai K_p , K_i dan K_d fitur anti-windup, soft start dan lainnya diaktifkan atau menggunakan sistem akhir untuk percobaan keseluruhan. Pengujian selanjutnya megevaluasi dari nilai overshoot, settling time dan ripplanya dengan evaluasi lanjutan untuk mengkonfigurasi nilai K_p , K_i , K_d . Pengujian ini

dilakukan berulang ulang untuk mendapatkan konfigurasi yang tepat dan hasil yang lebih baik daripada menggunakan metode Ziegler-Nichols. Pengujian dilakukan tanpa beban dan dengan beban 10 watt pada beberapa percobaan dan 5 watt digunakan pada percobaan akhir yang sebelumnya diuji secara singkat dan mendapatkan hasil yang bagus.

4.3.2.1 Pengujian Step Load PID Self Tuning 1

Pada tahap pengujian ini, dilakukan pencarian parameter PID melalui metode tuning mandiri (*self-tuning*) secara eksperimental dengan pendekatan *trial and error*. Tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan setelan parameter K_p , K_i , dan K_d yang mampu menghasilkan respon sistem yang lebih optimal dibandingkan dengan metode teoritis Ziegler-Nichols. Pengujian dilakukan pada komponen secara langsung dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban, untuk menganalisis secara murni karakteristik respon transien dari sistem kontrol terhadap step input.



Gambar 4. 16 Grafik Node-Red Pengujian Tanpa Beban dan Menggunakan Beban PID Self Tuning 1

Hasil pengujian disajikan pada **Gambar 4.16**, yang menampilkan grafik respon sistem dari dashboard Node-RED saat diberikan step input dengan setpoint 220V. Berdasarkan analisis data yang terekam, dapat dilihat bahwa parameter hasil tuning mandiri ini menghasilkan respon yang secara signifikan berbeda. Sistem menunjukkan sistem yang cukup responsif, yang ditandai dengan rise time (waktu naik) yang sangat cepat dilihat pada **Tabel 4.13**. Dari data tabel, tercatat sistem hanya membutuhkan waktu sekitar 3 detik untuk mencapai 90% dari nilai setpoint-nya. Kecepatan ini menunjukkan karakter kontroler yang jauh lebih agresif dibandingkan metode sebelumnya.

Respon yang agresif menghasilkan berupa lonjakan atau overshoot. Tegangan keluaran melampaui nilai setpoint dan mencapai puncak tertingginya pada 238.5V, yang setara dengan 8.4% dari setpoint. Setelah mencapai puncaknya, sistem mengalami beberapa osilasi kecil yang berhasil diredam dengan cepat oleh aksi derivatif dari kontroler. Sistem kemudian berhasil stabil dan masuk ke dalam rentang toleransi $\pm 2\%$ dari setpoint, dengan waktu tunak (*settling time*) tercatat sekitar 15 detik.

Tabel 4. 13 Data Pengujian PID Self Tuning 1 Bagian Tanpa Beban

Waktu	Tegangan	
	(V)	PWM
20:45:35	0	100
20:45:39	0	100
20:45:42	196.1	140
20:45:45	231.8	185
20:45:48	240.9	142
20:45:52	235.1	97
20:45:55	204.1	56
20:45:58	158.7	141
20:46:01	235.8	194
20:46:23	237.6	189
20:46:26	244	144
20:46:29	235.2	99
20:46:33	204.6	54
20:46:36	152.7	139
20:46:39	232.3	194
20:46:42	242.1	154
20:46:46	238.3	109
20:46:49	214.3	64
20:46:52	161.1	111
20:47:29	214.2	63
20:47:29	209.9	68

Waktu	Tegangan (V)	PWM
20:47:35	159.2	143
20:47:35	234	196
20:47:39	242.1	151
20:47:42	236.6	106
20:47:45	209.9	61
20:47:49	155.6	117
20:47:52	226.9	192
20:47:56	242	161

Secara analitis, metode tuning trial and error ini berhasil dalam segi meningkatkan performa kecepatan sistem secara drastis. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi Ziegler-Nichols yang cenderung lambat, parameter ini memiliki respon yang jauh lebih sigap. Nilai overshoot sebesar 8.4% merupakan sebuah *trade-off* yang dapat diterima untuk mendapatkan kecepatan tersebut. Dapat disimpulkan bahwa parameter PID yang diperoleh melalui metode tuning mandiri ini memberikan kecepatan respon yang lebih baik untuk sistem alternator ini, dan parameter ini akan digunakan sebagai acuan untuk pengujian pembebanan selanjutnya.

4.3.2.2 Pengujian Step Load PID Self Tuning 2

Setelah mendapatkan parameter PID yang optimal dari pengujian tanpa beban, tahap selanjutnya yaitu menguji performa parameter. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa dari parameter self-tuning ($K_p=0.8$, $K_i=0.125$, $K_d=0.625$) melalui sebuah uji pembebanan tiba-tiba (*step load test*). Sama seperti pengujian sebelumnya, gangguan diberikan menggunakan beban lampu pijar 10 Watt. Tujuan utamanya adalah untuk menganalisis kemampuan kontroler dalam meminimalisir *error* dan membandingkan hasilnya secara langsung dengan performa parameter Ziegler-Nichols dan tuning sebelumnya.



Gambar 4. 17 Grafik Node-Red Pengujian Tanpa Beban dan Menggunakan Beban PID Self Tuning 2

Hasil pengujian disajikan pada **Gambar 4.17** yang menampilkan rekaman data grafik dari dashboard Node-RED. Analisis detail dari data **Tabel 4.14** menunjukkan bahwa sebelum beban diberikan, sistem berjalan dengan sangat presisi pada kondisi tunak setelah mengalami overshoot hal ini juga dikarenakan nilai K_p yang lebih tinggi dari sebelumnya. Nilai PWM (garis oranye) stabil di sekitar 160V untuk *steady* sementara dan terlihat dari data **Tabel 4.14** pada Node-Red terjadi *error* pengiriman data ke Node-Red dan Broker. Redaman pada grafik sanagat terlihat dimana data puncak tidak mengalami overshoot tajam seperti pada tuning sebelumnya dengan kurang dari 5% nilai setpoint. Pada saat beban 10 Watt diaktifkan, terjadi penurunan tegangan sesaat hingga ke level terendah 184.8V. Respon kontroler PID terhadap gangguan drop tegangan cukup cepat dengan 3 detik pada dashboard grafik dapat beradaptasi. Nilai PWM melonjak secara drastis hingga puncaknya di 248V untuk mengkompensasi beban. Dari data PWM yang naik tegangan sistem menjadi tidak normal dan mengalami sedikit overshoot hingga 228.5V sebelum akhirnya kembali stabil, dan hal tersebut terlihat pada **Gambar 4.17 (a)**.

Tabel 4. 14 Data Pengujian PID Self Tuning 2 Bagian Tanpa Beban

Waktu	Tegangan	
	(V)	PWM
21:34:07	0	100
21:34:30	0	100
21:34:33	0	100
21:34:36	612.6	25
21:34:39	142.1	70

Waktu	Tegangan (V)	PWM
21:34:43	184.6	166
21:34:46	231	122
21:34:49	217.6	94
21:34:52	192.9	139
21:34:56	222.8	159
21:34:59	227	130
21:36:20	227.7	139
21:36:22	227.6	104
21:36:26	206.4	105
21:36:29	200.9	150
21:36:32	226.2	142
21:36:36	225.5	99
21:36:39	198.1	120
21:36:42	213.6	157
21:36:45	227.8	135
21:36:48	224.3	101
21:37:10	202.9	143
21:37:13	220.3	154
21:37:16	229.2	134
21:37:19	226.1	89
21:37:23	194.1	119
21:37:28	217.1	149
21:37:29	226.8	130
21:37:33	223.2	100
21:37:36	197.3	132

Analisis performa dari respon ini menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan parameter Ziegler-Nichols maupun tuning pertama. Karakteristik yang paling menonjol adalah kecepatan sistem. Keseluruhan proses, mulai dari saat tegangan turun hingga kembali stabil di setpoint 220V, hanya membutuhkan waktu

tunak (settling time) sekitar 5 detik. Tidak seperti pengujian sebelumnya yang mengalami saturasi dan *steady-state error*, kontroler dengan parameter *self-tuning* ini berhasil mengembalikan tegangan tepat ke setpoint 220V tanpa adanya *steady-state error*. Hal ini dimungkinkan karena parameter yang lebih agresif pada nilai K_p dan responsif dengan parameter K_i maupun K_d yang mampu mengoreksi error sebelum aktuator (PWM) mencapai titik saturasi total. Pada pengujian ini *drop voltage* dan *overshoot* dikoreksi dengan baik daripada sebelumnya menggunakan parameter PID yang berbeda. *Overshoot* dan *error steady* dapat diminimalisir dengan adanya nilai parameter integral yang dikurangi, karena sistem sebelumnya memiliki nilai lebih besar yang mengakibatkan *overshoot*. Karena parameter K_p ditambah maka untuk meredam *overshoot* K_i dapat dikurangi. Pada nilai K_d ditingkatkan untuk menurunkan *overshoot* dan mengurangi *error steady-state* walaupun tidak signifikan.

Sebagai kesimpulan analisa pengujian *step-load*, bahwa sistem ini memiliki keunggulan dari parameter PID yang diperoleh melalui metode *self-tuning* ($K_p=0.8$, $K_i=0.125$, $K_d=0.625$). Parameter ini terbukti mampu menghasilkan sistem kontrol yang cepat dan responsif dalam menghadapi gangguan beban. Adanya *overshoot* minor sebesar $\sim 3.8\%$ (228.5V) adalah hasil terbaik untuk memperoleh kecepatan pemulihan dan eliminasi total *steady-state error* saat berbeban.

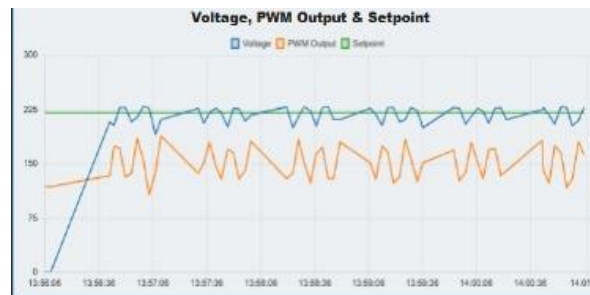
4.3.2.3 Pengujian Step Load PID Self Tuning 3

Pengujian pada tuning yang ke-3 ini merupakan tahapan yang mengevaluasi dari parameter yang dilakukan sebelumnya dengan melihat performa dahulu untuk hasil awal dan di uji langsung. Untuk pengecekan performa pada pengujian ini menggunakan beban lampu pijar 5 watt agar dapat melihat performa maksimal tanpa saturasi dan tidak mencapai maksimal PWM. Proses untuk mencari parameter ini menggunakan base data dari percobaan tuning sebelumnya dan di set secara manual dengan *trial and error* untuk mendapatkan hasil yang optimal. Berikut parameter kontrol PID yang saya gunakan yaitu:

- (a) Konstanta Proporsional (K_p) = 0,5
- (b) Konstanta Integral (K_i) = 0,015

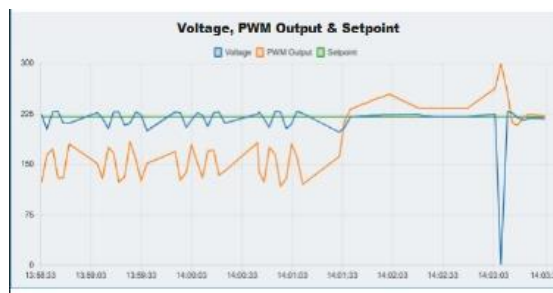
(c) Konstanta Derivatif (K_d) = 0,125

Pengujian pertama dilakukan dengan menjalankan sistem selama 5 menit tanpa memberikan beban lampu pijar. Tujuannya adalah untuk memvalidasi kemampuan dasar kontroler PID dalam mencapai dan mempertahankan tegangan setpoint pada kondisi ideal. Hasil respons sistem pada kondisi tanpa beban dapat dilihat pada **Gambar 4.18**.



Gambar 4. 18 Grafik Node-Red Pengujian PID Self Tuning 3 Tanpa Beban

Berdasarkan grafik terlihat tegangan output alternator (garis biru) sudah menacapai *setpoint* (garis hijau) dan data dipertahankan lebih baik dari data sebelumnya walaupun ada *ripple*. Fluktuasi dari tegangan sangat minimal dan masih termasuk dalam rentang toleransi $\pm 5\%$ terhadap nilai *setpoint*. Penggunaan konstanta proposional 0,5 dimana lebih kecil daripada percobaan sebelumnya yaitu 0,8. Penggunaan K_p yang rendah tersebut dapat meredam overshoot secara signifikan bahkan tidak terdapat overshoot pada *peak* awal. Penggunaan konstanta integral pada pengujian ini yaitu 0,015 dimana jauh dari percobaan tuning ke-2 yaitu 0,125 jauh lebih besar 9 kali dan untuk hasil dari grafiknya leebih bisa meredam waktu *error steady-state*. Pada parameter K_i yang kecil dapat mengurangi osilasi atau *ripple* jika dikurangi lebih banyak dan menjadikan grafik lebih halus, hal tersebut juga dapat dilihat saat adanya penggunaan beban terlihat pada **Gambar 4.19** dimana *steady error* dapat diredam. Pengujin ini menggunakan Konstanta Derivatif (K_d) sebesar 0,125 dimana lebih kecil dari tuning ke-2 yaitu 0,625. Hasil dari perubahan K_d ialah redaman terhadap osilasi berlebihan untuk tegangan aktual mendekati nilai *setpoint*.



Gambar 4. 19 Grafik Node-Red Pengujian PID Self Tuning 3 Menggunakan Beban

Pengujian pada simulasi *step load*, di mana sistem yang sedang berjalan osilasi lalu diberi beban resistif sebesar 5 Watt. Pengujian ini berlangsung selama 3 menit untuk mengamati kemampuan kontroler PID dalam mengkoreksi gangguan yang dapat dilihat pada **Gambar 4.19**. Ketika beban 5 Watt diaktifkan, secara teoritis akan terjadi penarikan arus yang menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*) pada terminal output alternator. Tugas utama kontroler PID adalah mendeteksi penurunan ini sebagai sebuah *error* dan segera memberikan kontrol. Hal tersebut berupa peningkatan sinyal PWM ke rangkaian driver, yang pada akhirnya menaikkan arus eksitasi untuk mengkompensasi penurunan tegangan.

Saat beban aktif, terjadi *error* yang dideteksi oleh komponen proporsional (K_p). Respon cepat kontroler dengan ($K_p=0.5$) memberikan koreksi untuk menaikkan arus eksitasi secara agresif. Pada penggunaan Konstanta Integral ($K_i=0.015$) memastikan bahwa setelah adanya gangguan atau *error*, tegangan tidak hanya mendekati *setpoint* tetapi kembali tepat ke 220V tanpa adanya *steady-state error*. Osilasi diredam dengan adanya Konstanta Derivatif ($K_d=0.125$) yang memiliki fungsi meredam *overshoot* atau osilasi yang terjadi karena respon agresif kontroler terhadap perubahan beban.

Tabel 4. 15 Data Pengujian PID Self Tuning 3 Menggunakan Beban 5watt

Waktu	Tegangan	
	(V)	PWM
14:00:09	222.4	110
14:00:13	205.8	144
14:00:16	226.9	145
14:00:19	227.2	113

Waktu	Tegangan (V)	PWM
14:00:22	211.3	119
14:00:42	224.1	155
14:00:43	227.8	119
14:00:46	217.3	105
14:00:49	204.8	149
14:00:52	229.1	140
14:00:56	227.8	99
14:00:59	202.4	109
14:01:02	210	153
14:01:06	228.3	137
14:01:09	225.8	102
14:01:31	197.6	137
14:01:34	204.5	182
14:01:37	219.9	197
14:01:41	220.6	200
14:01:44	221.1	203
14:01:47	221.4	205
14:01:50	222.1	208
14:01:54	222.7	211
14:01:57	223.3	213
14:02:00	223.7	216
14:02:18	224.2	199
14:02:21	221.1	198
14:02:24	221	198
14:02:27	220.8	198
14:02:30	220.7	198
14:02:34	220.7	198
14:02:37	220.5	198

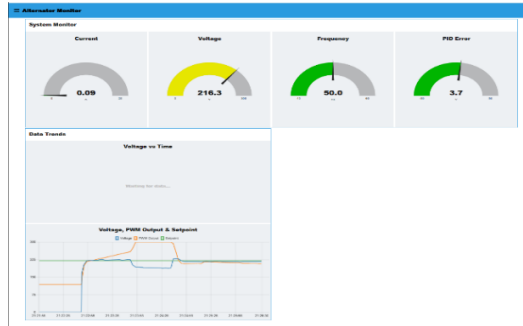
Pada **Tabel 4.15** menampilkan respons sistem pengujian pada saat diberi load dan data saat ingin dilakukan pengujian load 5 watt menggunakan lampu pijar. Pada

data tabel diatas diketahui bahwa pengujian saat menggunakan load yaitu saat waktu 14:01:31 dimana ditandai dengan tegangan turun hingga 197,6V. Secara visual, grafik pada **Gambar 4.19** menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan output dengan selisih dengan setpoint 220V yang relatif kecil dan sangat stabil. Fluktuasi yang terjadi bisa dilihat pada data **Tabel 4.15** dengan performa steady-state yang baik karena minim fluktuasi pada sebelum dan setelah diberikan beban atau load 5 watt.

Pada data tabel diatas hanya dalam 3 detik (pada 14:01:34), kontroler menaikkan nilai output PWM dari 137 menjadi 182. Ini adalah aksi gabungan dari komponen Proporsional (Kp) yang merespon *error* dan Integral (Ki) yang mengakumulasi *error*. Kenaikan PWM bertujuan meningkatkan arus eksitasi secara paksa untuk koreksi penurunan tegangan. Pada waktu 14:01:37 (hanya 6 detik setelah drop awal), nilai PWM kembali dinaikkan menjadi 197. Dan tegangan menjadi lebih ideal mendekati setpoint, mencapai 219.9 V. Pada data tabel, sistem mengalami *overshoot* tegangan sedikit melampaui *setpoint* dan mencapai puncaknya di 222.1 V pada 14:01:50. *Overshoot* minor ini adalah hasil yang wajar dari respon PID dan untuk pemulihan cepat dan diredam oleh Konstanta Derivatif (Kd).

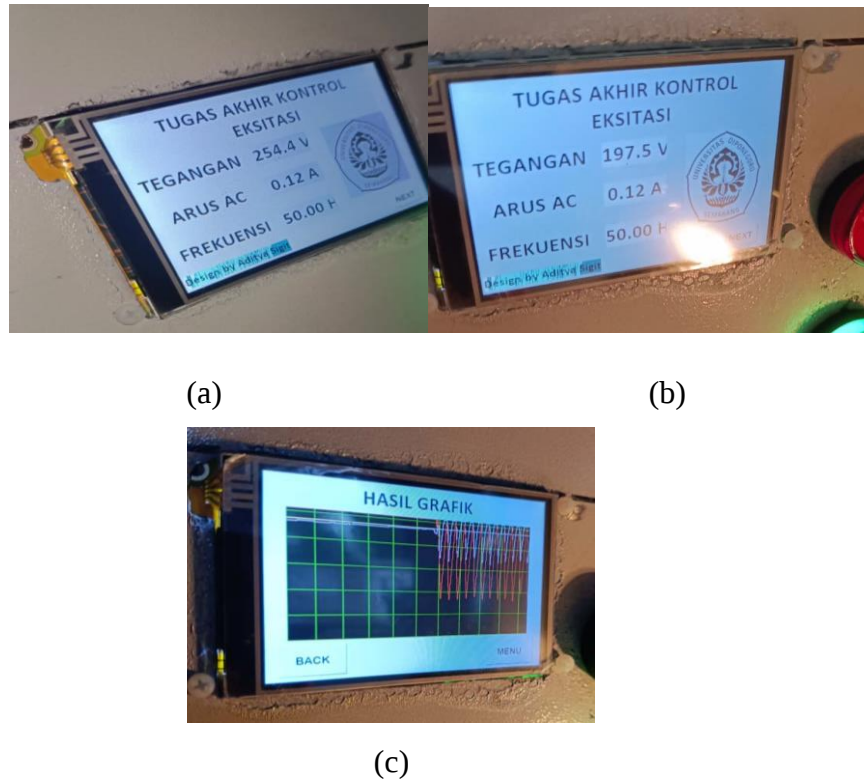
4.3.3 Pengujian Integrasi HMI Nextion dan IoT Node-Red

Pengujian ini bertujuan memastikan monitoring tidak mengganggu loop kontrol dan tampilan data. Pengujian utama pada integrasi ini minimal data yang dikirim dan diterima dapat tampil dengan baik dan tidak ada data error yang tertampil pada HMI Nextion maupun pada dashboard IoT. Pada pengujian ini memiliki dua basis mode yaitu mode “Manual dan mode “Otomatis” dimana pada pengujian ini data yang digunakan hanya saat mode “Otomatis”, karena keluaran antara dua mode tersebut sama untuk menampilkan data variabel sensor. Jadi pada pengujian sistem keseluruhan data yang ditampilkan dapat terlihat tanpa adanya *lagging* atau *error*. Beberapa hasil dari tampilan data yang terintegrasi HMI Nextion dan IoT Node-Red dapat dilihat pada **Gambar 4.20**.



Gambar 4. 20 Pengujian Data Tampilan Pada UI Node-Red 1

Pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan dari MQTT Broker dimana pada pengujian ini menggunakan menggunakan HiveMQ sebagai Broker. Pada dashboard bagian *gauge* bagian tegangan terlihat dengan angka 216,3V dimana nilai tersebut merupakan nilai akhir yang ada pada grafik. Dengan melihat garis grafik yang sedikit menempel dengan *setpoint* 220V bisa diperkirakan nilai sudah sesuai antara nilai gauge dan grafik pada dashboard Node-Red. Dengan adanya HMI Nextion yang memiliki kecepatan pengiriman data yang lebih akurat tersebut akan menjadi pembeda prioritas monitoring yang digunakan.



Gambar 4. 21 Tampilan HMI Nextion Sebelum Diberi Beban (a), Diberi Beban (b) dan Hasil Grafik Waveform (c) Pada Pengujian Integrasi HMI

Pada HMI target interval update yaitu 300 ms konsisten tanpa drop interval. Pada IoT topik MQTT dikirim 2–5 Hz pada setiap data yang diambil dan dikirim ke Node-Red. Delay yang didapat pada HMI Nextion sudah sesuai sekitar 200-300ms dan juga grafik pada Nextion sudah bekerja dengan baik tetapi tidak tertera satuan per garis grafik. Untuk grafik yang ada pada HMI Nextion merupakan akumulasi angka yang terlihat pada **Gambar 4.21** bagian page variable sensor, grafik sebagai petunjuk visual dari variabel yang terbaca. Untuk interval update sama dengan yang ada pada variabel sensor sekitar 300ms. Prioritas tampilan tetap pada HMI Nextion yang dapat diakses dengan realtime, hal tersebut dikarenakan karena IoT pada Node-Red bisa antri maupun ditolak yang dimana terkadang hasil dari IoT dapat selalu tertinggal dengan data yang langsung dikirimkan pada sistem dan di tampilkan pada layar HMI Nextion.

Tabel 4. 16 Pengujian Status Pada Node Dashboard Node-Red dan Tool Pada HMI Nextion

Fitur	HMI Nextion	Node-Red	Keterangan
Monitoring Arus	Berhasil	Berhasil	Data Konsisten
Monitoring Tegangan	Berhasil	Kurang Berhasil	Kurang Konsisten
Monitoring PWM	-	Berhasil	Data Konsisten
Monitoring Frekuensi	Berhasil	Berhasil	Data Konsisten
Setting Manual	Berhasil	Berhasil	Data Konsisten
Setting Otomatis	Berhasil	Berhasil	Data Konsisten