

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

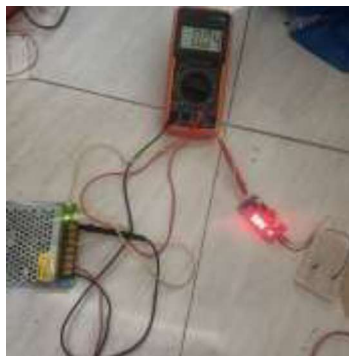
Dilakukan pengujian dan analisa pada sistem distribusi *water refrigerant* dan AHU untuk memastikan setiap komponen dan sistem bekerja dengan rancangan yang dibuat. Dalam pengujian ini dilakukan beberapa kali pengujian guna mendapatkan hasil yang akurat.

4.1. Pengujian Komponen

Pengujian dilakukan pada seluruh komponen dalam sistem distribusi *water refrigerant* dan AHU. Pengujian ini diperlukan sebagai prosedur untuk memastikan apakah tiap komponen elektrik sudah sesuai dan tidak terdapat malfungsi atau kerusakan. Data dan hasil yang didapat diukur menggunakan bantuan alat ukur sesuai kebutuhan komponen.

4.1.1. Power Supply 24V DC 5A dan Step Down LM2596

Pengujian *power supply* dan modul *stepdown* pada alat ini bertujuan untuk memastikan tegangan pada rangkaian alat tidak *over voltage* yang akan merusak komponen. Pengujian ini dilakukan bersamaan agar mengetahui nilai efisiensinya. Pengujian dilakukan seperti pada **Gambar 4.1** berikut.



Gambar 4.1. Pengujian *Power Supply* Dengan *Stepdown* LM2596

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 12V 5A			Stepdown LM2596			Efisiensi (%)
		$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$P_{in}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$P_{out}(W)$	
1.	100	24	0,18	4,32	12	0,25	3	69,4
2.	220	24	0,11	2,64	12	0,12	1,44	53
3.	470	24	0,05	1,2	12	0,02	0,24	20
4.	560	24	0,05	1,2	12	0,01	0,12	10
5.	1k	24	0,04	0,96	12	0,05	0,01	1

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1.** Stepdown LM2596 menghasilkan tegangan yang stabil pada outputnya meskipun ada perubahan pada nilai beban yang digunakan. Serta menunjukan nilai efisiensi yang berubah ubah sesuai beban yang digunakan dengan nilai angka efisiensi yang baik di beban yang tidak terlalu kecil. Dari data tersebut menunjukan batasan penggunaan *Buck Converter* LM2596 pada daya rendah karena modul ini menjadi sangat tidak efisien yang menunjukan nilai 10 hingga 1% pada beban yang rendah sesuai dengan perhitungan persamaan (2.4). dengan demikian pemilihan penggunaan *Stepdown* yang memiliki spesifikasi yang lebih baik dapat meningkatkan nilai efisisnsinya sehingga nilai output dari modul akan lebih baik.

4.1.2. PLC TM241 CE24T

Pengujian dilakukan pada controller PLC Schneider TM241 CE24T dengan tujuan memastikan bahwa perangkat berada dalam kondisi baik dan dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Metode pengujian yang digunakan adalah dengan mengoperasikan program ladder sederhana untuk membaca input pin digital (I0). Hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.2.**

Tabel 4.2. Pengujian Fungsionalitas PLC TM241CE24T

Hasil pengujian	Keterangan
	Setelah program ladder di transfer ke dalam PLC indikator run dan led pin I0 menyala menandakan inputan nilai pada pin input telah berhasil dan PLC bekerja dengan semestinya

4.1.3. Pompa

Pengujian pada motor pompa dc dilakukan untuk memastikan pompa bekerja dengan semestinya dengan dapat mengalirkan air menuju AHU melewati sensor YF – S201. Pengujian di lakukan dengan menghidupkan pompa dengan output PWM PLC melewati *driver* BTS dan rangkaia LC dengan di set menggunakan program ladder sederhana. Berikut untuk data pengujian fungsionalitas pompa terdapat pada **Tabel 4.3.**

Tabel 4.3. Pengujian Fungsionalitas Pompa

No	Hasil Pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 menunjukan hasil pembacaan oscilloscope pada output rangkaian LC dengan bentuk grafik yang datar dengan tegangan terukur (11,6V)
2		Gambar 2 menunjukan ampere tertinggi pada saat starting di nilai (1,28A) dan stabil pada (1,27A)

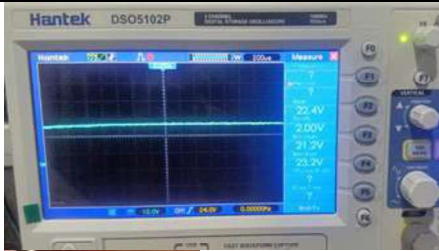
Berdasarkan **Tabel 4.3**, dapat dijelaskan bahwa data pengujian fungsionalitas pompa menunjukan hasil yang memuaskan yang mana bentuk grafik output dari rangkaian LC sudah berbentuk datar, sehingga aman untuk komponen pompa. Sedangkan nilai pengukuran ampere di (1,27) menunjukan nilai yang jauh lebih tinggi dari spesifikasi pada datasheet hal ini bisa jadi disebabkan oleh spesifikasi pabrik tidak tepat, tetapi setelah dilakukan uji coba selama 10 menit suhu pada pompa masih aman sehingga masih aman untuk digunakan.

4.1.4. Fan Blower

Pengujian fungsionalitas pada *fan blower* dilakukan untuk memastikan *blower* bekerja dengan sempurna untuk menyalurkan udara dingin dari *coil secondary evaporator* menuju ruangan dengan kecepatan yang bisa di kontrol oleh PWM PLC. Pengujian dilakukan dengan cara mengontrol *blower* dengan output PWM PLC dan rangkaian filter LC untuk meratakan gelombang PWM nya sebagai

inputan final *blower*. Data pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.4**, pengujian fungsionalitas *fan blower* berikut:

Tabel 4.4. Data pengujian fungsionalitas *fan blower*

NO	Hasil pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 menunjukan bentuk grafik dari output rangkaian filter LC untuk <i>fan blower</i> sudah berbentuk DC murni datar, dan mean pada (22,4V)
2		Gambar 2 menunjukan pengukuran ampere pada saat awal starting bernilai(1,65A) dan saat stabil (1,44A)

Berdasarkan pada **Tabel 4.4**, dapat dijelaskan bahwa data pengujian fungsionalitas *fan blower* menunjukan nilai pembacaan grafik pada input *fan blower* dari rangkaian filter LC sudah sempurna dan aman untuk komponen elektronik *fan*, kemudian pada pengukuran ampere bernilai tertinggi (1,65A) saat starting dan stabil pada (1,44A) sudah sesuai dengan spesifikasi dengan perhitungan daya menggunakan persamaan (2.8) menghasilkan daya 32 watt.

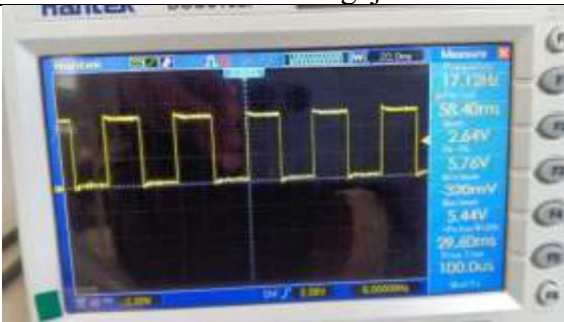
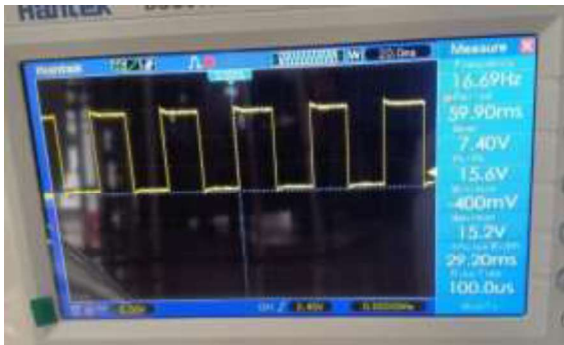
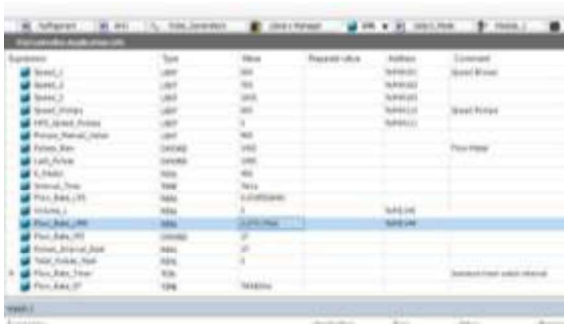
Dapat disimpulkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian filter LC DC murni lalu tegangan sampai ke beban dengan baik dan tidak ada lonjakan arus yang tinggi pada saat starting. Dengan begitu *fan blower* sudah siap digunakan pada penelitian ini.

4.1.5. Sensor Yf S201

Pengujian pada sensor Yf– S201 ini dilakukan untuk memastikan keakuratan pembacaan laju aliran air pendingin dari *tube heat exchanger* dengan pompa menuju air *handling unit* (AHU). Sesuai dengan hasil perhitungan kalibrasi pada bab 3 perencanaan sistem distribusi *water refrigerant* yang mana diketahui *K factor* untuk 1(satu) liter per menit laju aliran air adalah 483,6 Hz dan frekuensi per detiknya adalah 8,06 Hz, data *K factor* tersebut dimasukan ke dalam logika ladder program

untuk menghitung laju aliran air dalam sensor sehingga menghasilkan data pembacaan dalam liter per menit. Untuk membuktikan keakuratan komunikasi pembacaan dari sensor dengan PLC menggunakan *optocoupler* sebagai *level shifter* dilakukan pengujian pembacaan frekuensi dari *output* data sensor dan *output* data *optocoupler* menuju input HSC (*high speed counter*) pada PLC. Data pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.5**. Pengujian fungsionalitas sensor YF – S201 berikut:

Tabel 4.5. Pengujian Fungsionalitas Sensor YF – S201

No	Hasil Data Pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 adalah data grafik yang di ukur pada output data sensor ke input data sensor ke input <i>optocoupler</i> dengan menunjukan nilai frekuensi 17,12Hz, dengan nilai tegangan tertinggi (5,44V) dan terendah (- 320mV) dan raise time 100 mikrodetik.
2.		Gambar 2 adalah data grafik yang di ukur pada output <i>optocoupler</i> yang menuju ke input HSC pada PLC menunjukan data frekuensi 16,69Hz dan nilai tegangan tertinggi pada 15,6V dengan terendah pada -400mV serta waktu rise time yang sama pada 100 mikrodetik.
3.		Gambar 3 adalah data pembacaan laju aliran oleh sensor pada ladder PLC yang menunjukan nilai <i>Flow Rate</i> PPI(pulse per interval) yang didapat dari operasi pembacaan pulse saat ini di kurangi pulse sebelumnya dalam waktu 1 detik dengan nilai 17 Hz

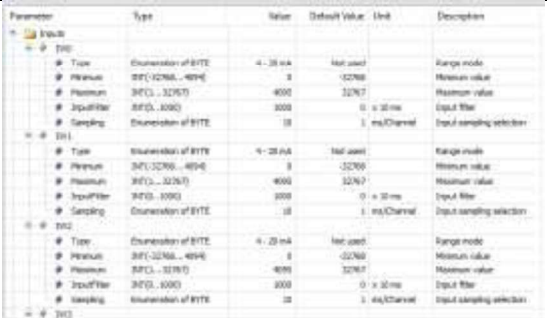
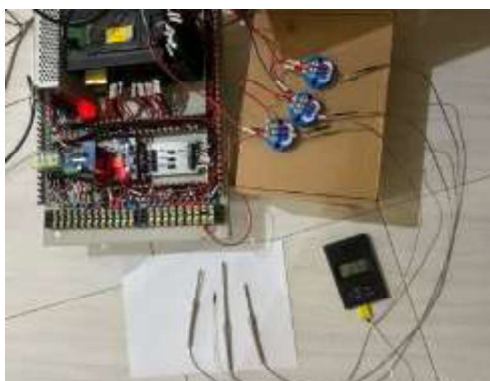
Berdasarkan **Tabel 4.5**. Pengujian fungsionalitas Sensor YF – S201 dengan membandingkan grafik pembacaan oscilloscope pada output data sensor dan output *optocoupler* input HSC PLC didapati hasil nilai frekuensi pada output *optocoupler* turun menjadi 16,69Hz dari pada sisi inputnya 17,12Hz hal ini disebabkan adanya

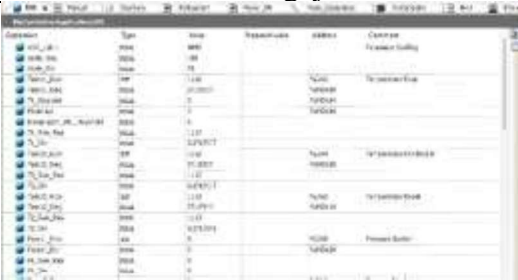
noise dari debit air yang tidak selamanya bisa konstan, namun masih dalam batas yang normal dan tidak mempengaruhi hasil konversi pembacaan pada PLC seperti pada hasil pembacaan pada *software machine expert* yang menunjukan data 17Hz pada variabel *Flow Rate PPI*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sensor YF – S201 dapat bekerja dengan sempurna dalam mengkonversi frekuensi dari output sensor menuju input PLC melewati *optocoupler* sebagai *level shifter* tegangan PWM.

4.1.6. Sensor RTD PT100

Pengujian *sensor temperature* RTD PT100 dilakukan untuk mengetahui fungsionalitas kinerja sensor melalui pembacaan pada monitoring PLC. Pengujian dilakukan dengan ladder program sederhana untuk membaca nilai sensor pada suhu ruangan untuk menampilkan nilai pembacaan yang terukur kemudian dibandingkan dengan alat ukur digital thermometer. Berikut data percobaan pengujian fungsionalitas sensor RTD PT100 bisa dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6. Data Percobaan Fungsionalitas Sensor RTDPT100

No	Hasil Pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 menunjukan pengalaman channel dari sensor pada IW0, IW1 dan IW2, dengan di set tipe input 4 – 20 mA dan scaling bit pada 0 – 4095. Filter di atur di nilai maksimal (1000) dan sampling data 10 dalam 1 ms.
2		Gambar 2 menunjukan wiring perobaan dengan input sensor pada modul ekstension TM3AI8 analog input dan alat ukur digital thermometer TM – 902C dengan pembacaan nilai 27,1°C.

No	Hasil Pengujian	Keterangan
3		Gambar 3 adalah tampilan pembacaan pada software machine expert yang menunjukan nilai pembacaan sensor 1 pada 27,15507, sensor 2 pada 27,17949 dan sensor 3 pada 27,15507.

Berdasarkan **Tabel 4.6.** data pengujian sensor RTD PT100 didapati hasil scaling sensor pada channel IW0 dengan persamaan (2.6), menghasilkan 27,15507. Sedangkan pembacaan digital thermometer pada 27,1°C yang mana jika di hitung nilai *error* nya menggunakan persamaan (2.7), adalah 0,0020321% Dengan hasil perhitungan dan perbandingan dapat disimpulkan pembacaan sensor RTD PT100 memiliki keakuratan yang baik sehingga dapat digunakan dalam penelitian ini

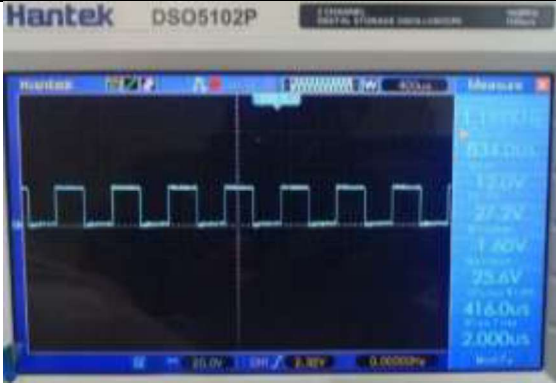
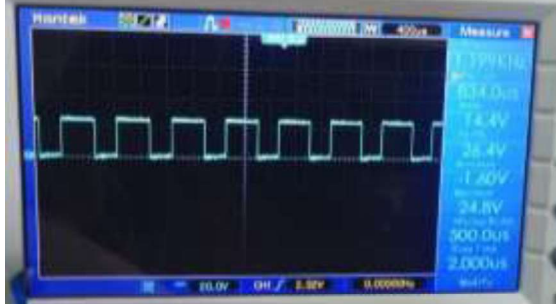
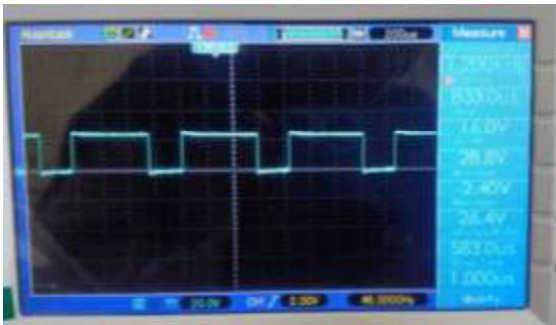
4.2. Pengujian Kontrol PWM

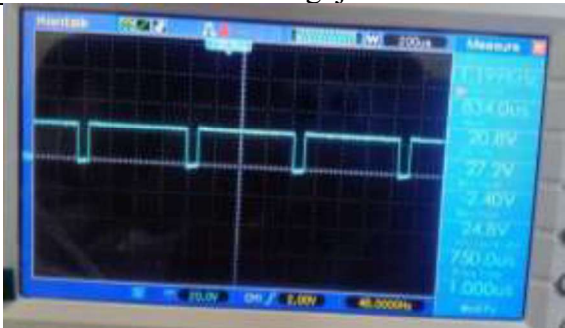
Dilakukan pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keakuratan komunikasi kontrol PWM dari output PLC ke aktuator melalui rangkaian *level shifter* menggunakan *optocoupler* dan *driver* motor BTS7960 untuk mengontrol kebutuhan power pompa dan rangkaian filter LC untuk meratakan gelombang PWM menjadi tegangan yang aman untuk *supply* motor *fan* blower dan pompa.

4.2.1. Pengujian PWM Output PLC

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang output PWM yang dikeluarkan oleh output PLC untuk memastikan keandalan PLC TM241CE24T dalam kontrol PWM. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengsetting output PWM PLC dengan Frekuensi 1200 Hz dan *duty cycle* yang divariasikan dari 50% sampai 100%, kemudian mengukur output PWM menggunakan *oscilloscope* pada masing masing pin output Q0 dan Q1. Berikut data pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.7.**

Tabel 4.7. Pengujian Output PWM PLC

NO	Hasil Pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 diset frekuensi pada 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 50% meghasilkan : 1. Frekuensi (1,199KHz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (12V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (25,6) 6. Pulse width (416,0μs) 7. Rise time 2 mikrodetik
2		Gambar 2 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 60% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (14,4V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width(500,0μs) 7. Rise time (2μs)
3		Gambar 3 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 70% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,200Khz) 2. Periode (833,0μs) 3. Mean (16V) 4. Min (-2,40V) 5. Max (26,4V) 6. Pulse width (583,0μs) 7. Rise time (1 μs)
4		Gambar 4 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 80% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,201Khz) 2. Periode (832,0μs) 3. Mean (18,4V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (666,0μs) 7. Rise time (2 μs)

NO	Hasil Pengujian	Keterangan
5		Gambar 5 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 90% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834.0 μs) 3. Mean (20,8V) 4. Min (-2,40V) 5. Max (24,8) 6. Pulse width (750,0 μs) 7. Rise time (1 μs)
6		Gambar 6 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 100% menghasilkan : 1. Frekuensi 0 2. Periode 0 3. Mean (22,8V) 4. Min (22,2V) 5. Max (23,2V) 6. Pulse width 0 7. Rise time 0

Pada **Tabel 4.7**. Menunjukkan hasil pengujian output PWM PLC dengan setting frekuensi 1200Hz dan *duty cycle* yang di variasikan dari 50% sampai 100% secara keseluruhan dilihat dari grafik yang terbaca menghasilkan bentuk yang sangat baik seperti pada duty 50% frekuensi yang terbaca pada 1,199KHz yang mana terdapat *error* 1 Hz (0,08%) lalu kita hitung keakuratan *duty cycle* yang terbaca dengan persamaan berikut:

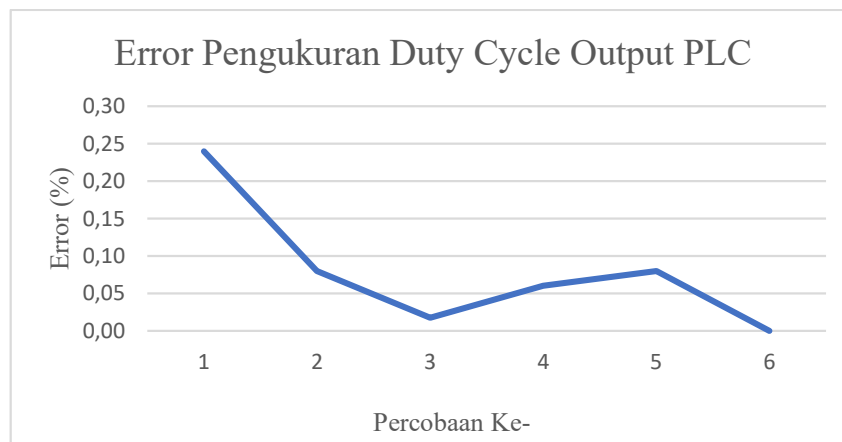
$$duty\ cycle = \frac{416}{834} \times 100\%$$

$$duty\ cycle = 49,88\%$$

Perhitungan hasil *duty cycle* 49,88 sudah mendekati 50%, selisih 0,12% sangat wajar karena adanya waktu naik *rise time* dan toleransi *noice* pengukura oscilloscope, hal ini dibuktikan karena pembacaan mean 12V dengan input sistem 24V maka *duty cycle* sudah tepat 50%. Kemudian untuk hasil perhitungan data *duty cycle* 60, 80, dan 100% dapat dilihat pada **Tabel 4.8**. Perhitungan *error* output PWM PLC berikut.

Tabel 4.8. Perhitungan *Error* Output PWM PLC

No	<i>Duty cycle</i> Input (%)	Mean	<i>Pulse Width</i>	Periode	<i>Duty cycle</i> Pengukuran (%)	<i>Error</i> (%)
1	50	12	416	834	49,88	0,24
2	60	14,4	500	834	59,95	0,08
3	70	16	583	833	69,99	0,02
4	80	18,4	666	832	80,05	0,06
5	90	20,8	750	834	89,93	0,08
6	100	22,8	0	0	100,00	0,00

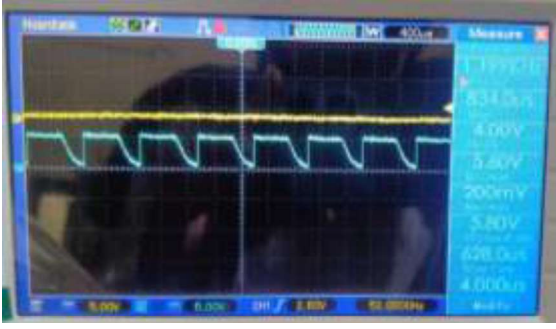
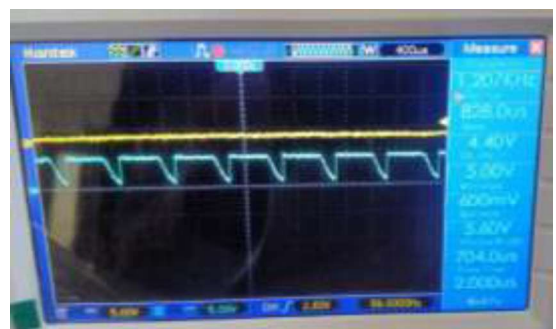
**Gambar 4.2.** Grafik *Error* Pengukuran PWM Output PLC

Berdasarkan **Tabel 4.8** dan **Gambar 4.2**, pengujian output PWM pada PLC menunjukkan performa yang sangat stabil dan presisi, karena PLC mampu mempertahankan frekuensi output mendekati 1200 Hz (Periode $\sim 834 \mu\text{s}$) secara konsisten pada berbagai variasi *Duty cycle*. Output PWM PLC memiliki akurasi *duty cycle* yang baik karena selisih antara nilai input program (*Set Value*) dan hasil pengukuran osiloskop (*Process Value*) sangat kecil, dengan *error* maksimum hanya sebesar 0,24% dan rata-rata *error* di bawah 0,1%. PLC juga memiliki linearitas yang bagus karena tegangan rata-rata (*Mean Voltage*) meningkat secara linear seiring penambahan *Duty cycle*, membuktikan bahwa modul PWM PLC bekerja ideal sebagai pengatur daya keluaran. Dengan ini membuktikan bahwa output PWM PLC layak dan handal untuk digunakan dalam pengontrolan kecepatan aktuator *fan blower* dan pompa.

4.2.2. Pengujian PWM Output *Optocoupler* Level Shifter

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang data yang keluar dari output optocouler yang sudah di turunkan levelnya dari PLC 24V ke 5V untuk input logika *driver* BTS 7960. Hal ini harus dipastikan untuk mengetahui kesesuaian tranfer logika kontrol PWM untuk *fan blower* dan pompa nantinya. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur signal PWM keluaran dari *optocoupler* menggunakan *oscilloscope* dengan variasi inputan *duty cycle* nya. Berikut data pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9. pengujian output keluaran *optocoupler level shifter*

No	Hasil Pengujian	Keterangan
1.		Gambar 1 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 50% Menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0µs) 3. Mean (3,40V) 4. Min (0,00V) 5. Max (5,60V) 6. Pulse width(548,0µs) 7. Rise time (4 µs)
2.		Gambar 2 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 60% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0µs) 3. Mean (4,0V) 4. Min (200mV) 5. Max (5,8V) 6. Pulse width (628,0 µs) 7. Rise time (4 µs)
3.		Gambar 3 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 70% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,207KHz) 2. Periode (828,0µs) 3. Mean (4,40V) 4. Min (600mV) 5. Max (5,60V) 6. Pulse width (704,0µs) 7. Rise time (2µs)

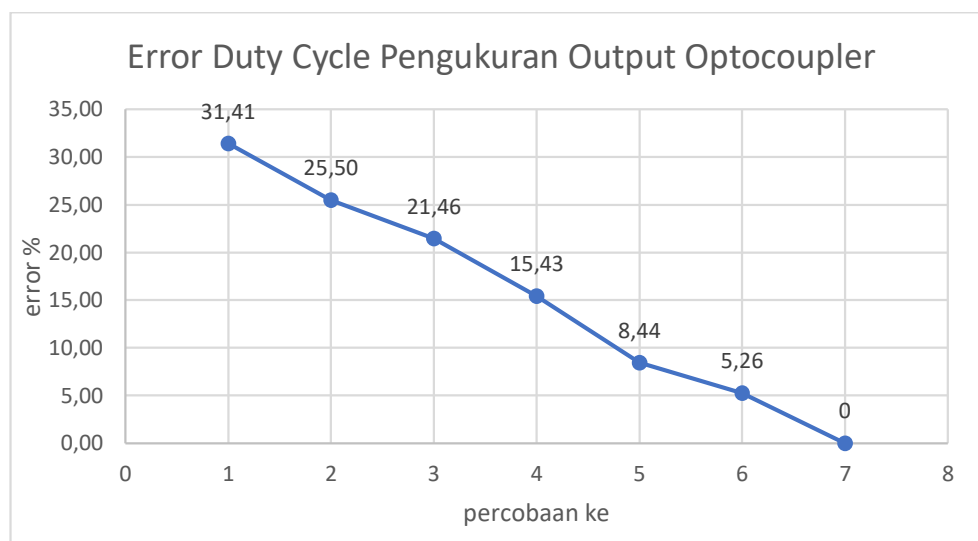
No	Hasil Pengujian	Keterangan
4		Gambar 4 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 80% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,196Khz) 2. Periode (836,0µs) 3. Mean (4,80V) 4. Min (1,60V) 5. Max (5,40V) 6. Pulse width (772,0µs) 7. Rise time (2µs)
5		Gambar 5 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 90% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,201Khz) 2. Periode (832,0µs) 3. Mean (5V) 4. Min (3,2V) 5. Max(5,6V) 6. Pulse width (812,0µs) 7. Rise time (6µs)
6		Gambar 6 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 95% menghasilkan : 1. Frekuensi 0 2. Periode 0 3. Mean (5V) 4. Min (4,2V) 5. Max (5,6V) 6. Pulse width 0 7. Rise time 0
7		Gambar 7 diset frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 100% menghasilkan : 1. Frekuensi 0 2. Periode 0 3. Mean (5V) 4. Min (4,6V) 5. Max (5,6V) 6. Pulse width 0 7. Rise time 0

Berdasarkan data **Tabel 4.9**, pengujian output keluaran *optocoupler* sebagai *level shifter* menghasilkan nilai frekuensi yang stabil sesuai nilai inputan frekuensi yang diberikan, tetapi terdapat *error* nilai *duty cycle* yang terbaca, hal ini

disebabkan oleh bentuk gelombang yang melengkung pada ekornya. Masalah ekor gelombang yang cacat ini karena terjadi “*slow discharge*” pada saat *fall time*, seperti pada pengukuran input *duty cycle* 50%. Saat rise time garisnya naik tegak lurus (vertikal), ini sangat bagus yang berarti tegangan naik instan kemudian saat fall time garis melengkung seperti “sirip hiu” artinya tegangan tidak langsung jatuh ke (0V), melainkan turun pelan – pelan. Efeknya pada hasil output *duty cycle* adalah *pulse width* (lebar pulsa) menjadi lebih besar (548 μ s) sehingga nilai *duty cycle* yang keluar membengkak mejadi 65%. Untuk perhitungan nilai *error duty cycle* bisa dilihat pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10. Perhitungan *Error Pengukuran Duty cycle Output Optocoupler*

no	<i>duty cycle</i> input (%)	Mean (V)	pulse width (μ s)	Periode (μ s)	<i>duty cycle</i> pengukuran (%)	<i>error</i> (%)
1	50	3,4	548	834	65,71	31,41
2	60	4	628	834	75,30	25,50
3	70	4,4	704	828	85,02	21,46
4	80	4,8	772	836	92,34	15,43
5	90	5	812	832	97,60	8,44
6	95	5	0	0	100	5,26
7	100	5	0	0	100	0



Gambar 4.3. Grafik *Error Duty Cycle Output Optocoupler*

Berdasarkan **Tabel 4.10** dan **Gambar 4.3**, terlihat adanya penyimpangan data (*error*) yang sangat signifikan antara *duty cycle* input (perintah PLC) dengan *duty cycle* Pengukuran (hasil pembacaan *oscilloscope*). Tren data menunjukkan korelasi negatif, di mana semakin kecil persentase *duty cycle* yang diberikan, semakin besar persentase *error* yang dihasilkan.

Pada percobaan pertama dengan input 50%, terjadi penyimpangan terbesar mencapai 31,41%. Data menunjukkan output terukur melebar menjadi 65,71% (*Pulse Width* 548 μ s) padahal seharusnya hanya 50% (416 μ s). Fenomena "pembengkakan" lebar pulsa ini disebabkan oleh kondisi output mengambang (*floating*) pada rangkaian *optocoupler* yang tidak memiliki resistor *pull-down*. Saat sinyal seharusnya *OFF* (logika 0), tegangan tidak langsung jatuh ke 0V secara instan, melainkan turun secara perlahan menyerupai kurva pengosongan kapasitor (*slow discharge*). Akibatnya, *oscilloscope* masih mendeteksi tegangan tersebut sebagai logika "*HIGH*" untuk durasi yang lebih lama, sehingga nilai *duty cycle* terhitung lebih besar dari nilai aktualnya.

Grafik 4.2 memperlihatkan penurunan *error* secara linear seiring bertambahnya *duty cycle*. Pada input 90%, *error* turun menjadi 8,44%, dan pada input 100%, *error* menjadi 0%. Penurunan ini terjadi karena semakin besar *duty cycle*, durasi waktu "*OFF*" menjadi semakin sempit. Karena distorsi sinyal hanya terjadi pada fase "*OFF*" (saat penurunan tegangan), maka semakin sedikit waktu *OFF*, semakin kecil pula dampak distorsi tersebut terhadap persentase keseluruhan. Pada kondisi 100%, sinyal menjadi DC murni (tidak ada fase *OFF*), sehingga tidak ada distorsi transisi yang terjadi, menghasilkan akurasi sempurna.

Meskipun terdapat deviasi antara *duty cycle* input dan output terukur akibat karakteristik respon transien *optocoupler* (seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.10**), sistem ini tetap dipertahankan dan layak digunakan dengan menerapkan strategi kompensasi perangkat lunak (*Software Compensation*). Berdasarkan grafik karakteristik *error* **Gambar 4.2** yang menunjukkan pola linear dan deterministik, pengendalian presisi tetap dapat dicapai dengan melakukan kalibrasi input. program PLC dirancang untuk menggeser nilai *duty cycle* input berdasarkan tabel karakterisasi yang telah didapat, sehingga *output* yang diterima *driver* motor tetap

sesuai dengan setpoint yang diinginkan. Selain itu, karakteristik *decay* yang lambat pada sinyal output memberikan keuntungan tambahan berupa peredaman efek *switching noise* pada sistem distribusi daya.

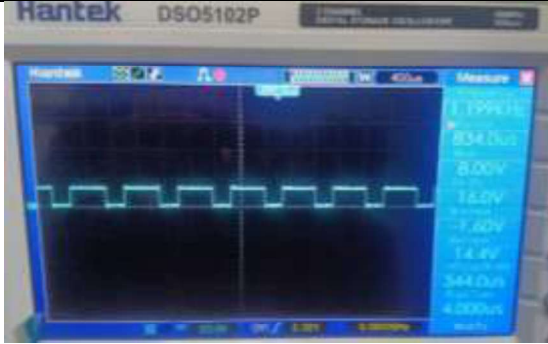
4.2.3. Pengujian PWM output *Driver* BTS7960

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang dan nilai logika yang keluar dari *driver* BTS7960 untuk memastikan logika yang dinput pada PLC sudah sesuai dengan yang menuju ke aktuator. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur output voltase dan gelombang PWM pada *driver* menggunakan *oscilloscope* sesuai input daya dan *duty cycle* yang diberikan untuk *fan blower* dan pompa.

a. Pengujian output BTS7960 pompa

Driver BTS7960 untuk pompa diberikan *supply* daya 12V sesuai kebutuhan pompa yang digunakan, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk kestabilan gelombang outputnya dengan variasi input *duty cycle*. Pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.11** berikut.

Tabel 4.11. Pengujian PWM Output *Driver* BTS7960 Pompa

No	Hasil Pengujian	Keterangan
1		Gambar 1 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 50% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0µs) 3. Mean (8V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (14,4V) 6. Pulse width (544,0µs) 7. Rise time (4µs)
2		Gambar 2 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 60% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0µs) 3. Mean (9,6V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (14,4V) 6. Pulse width (630,0µs) 7. Rise time (4µs)

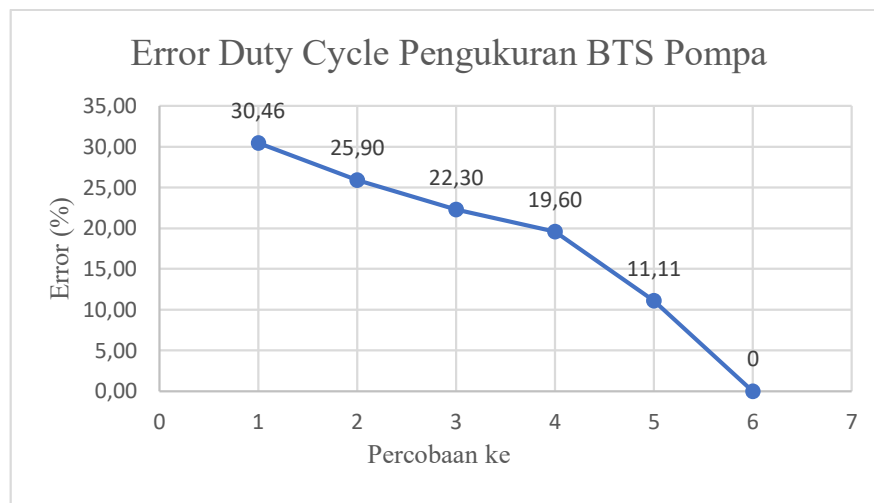
No	Hasil Pengujian	Keterangan
3		Gambar 3 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 70% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (10,4V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (13,6V) 6. Pulse width (714,0μs) 7. Rise time (4μs)
4		Gambar 4 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 80% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (12V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (13,6V) 6. Pulse width (798,0μs) 7. Rise time (6μs)
5		Gambar 5 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 90% menghasilkan : 1. Frekuensi (0) 2. Periode (0) 3. Mean (12V) 4. Min (11,2V) 5. Max (13,6V) 6. Pulse width (0) 7. Rise time (0)
6		Gambar 6 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 100% menghasilkan : 1. Frekuensi (0) 2. Periode (0) 3. Mean (12V) 4. Min (11,2V) 5. Max (13,6V) 6. Pulse width (0) 7. Rise time (0)

Berdasarkan **Tabel 4.11**, Pengujian *Driver* BTS7960 Output Pompa didapati hasil gelombang PWM yang sempurna (gelombang kotak), karena dari hasil pengujian pada Gambar memperlihatkan bahwa *driver* motor BTS7960 berhasil merekonstruksi kembali sinyal input dari *optocoupler* menjadi gelombang kotak

(*square wave*) yang tajam, sehingga transfer daya ke motor menjadi efisien. Namun, *driver* ini mewarisi kesalahan durasi (*timing error*) dari tahap sebelumnya, di mana lebar pulsa terukur mengalami pelebaran signifikan (input 50% terukur menjadi 544 μs atau setara 65,2%) akibat keterlambatan sinyal input turun ke ambang batas logika *Low*.

Tabel 4.12. Perhitungan *Error* Pengukuran *Duty Cycle* Output *Driver* Pompa

No	Duty Input (%)	Mean (V)	Pulse Width (μs)	Periode (μs)	Duty cycle Pengukuran (%)	Error (%)
1	50	8	544	834	65,23	30,46
2	60	9,6	630	834	75,54	25,90
3	70	10,5	714	834	85,61	22,30
4	80	12	798	834	95,68	19,60
5	90	12	0	0	100	11,11
6	100	12	0	0	100	0



Gambar 4.4. Grafik *Error* Pengukuran *Driver* BTS7960 Pompa

Berdasarkan **Tabel 4.12** dan **Gambar 4.4**, terlihat bahwa karakteristik *error* pada output *driver* pompa memiliki pola yang identik dengan *error* yang terjadi pada output *optocoupler*. Pada pengujian *Duty cycle* 50%, *driver* menghasilkan output sebesar 65,23% (*error* 30,46%), angka yang sangat mendekati *error* *optocoupler* pada **Tabel 4.10**, sebesar 31,41%.

Fenomena ini menunjukkan terjadinya propagasi *error* (*Error Propagation*). *driver* motor BTS7960 memiliki impedansi input yang tinggi, sehingga ia mendeteksi tegangan sisa (*residual voltage*) dari efek *slow decay optocoupler* sebagai sinyal logika '*HIGH*'. Akibatnya, durasi penyalaan (*ON-time*) pada sisi beban (pompa 12V) menjadi lebih panjang daripada sinyal perintah asli dari PLC.

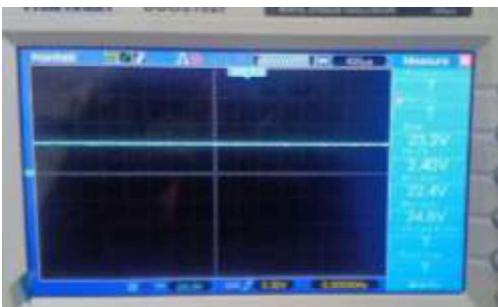
Selain itu, data menunjukkan terjadinya saturasi sinyal pada input di atas 90%. Pada titik ini, waktu jeda (*OFF-time*) sinyal input lebih singkat daripada waktu peluruhan tegangan *optocoupler*, menyebabkan tegangan input *driver* tidak pernah menyentuh logika '*LOW*'. Hal ini mengakibatkan pompa beroperasi pada kapasitas penuh (100%) meskipun input yang diberikan baru mencapai 90%, mempersempit resolusi kendali efektif pada rentang atas.

b. Pengujian Output BTS7960 *Fan Blower*

Driver BTS7960 untuk pompa diberikan *supply* daya 24V sesuai kebutuhan *fan blower* yang digunakan, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk kestabilan gelombang outputnya dengan variasi input *duty cycle*. Pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.13** berikut.

Tabel 4.13. Pengujian PWM output *Driver* BTS7960 *Fan Blower*

No	Hasil Pengujian	Keterangan
1.		Gambar 1 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 50% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0µs) 3. Mean (15,2V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (25,6V) 6. Pulse width (552,0µs) 7. Rise time (2µs)

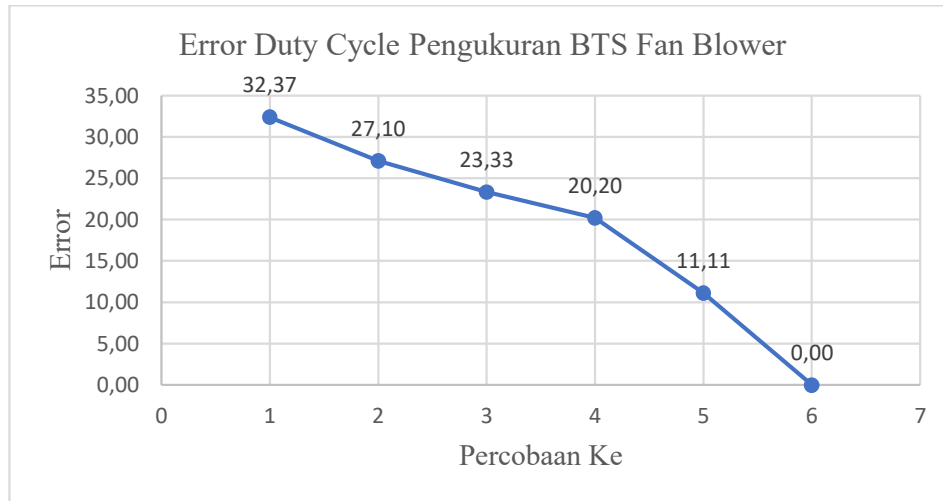
No	Hasil Pengujian	Keterangan
2.		Gambar 2 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 60% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (17,6V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (636,0μs) 7. Rise time (4μs)
3.		Gambar 3 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 70% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (20V) 4. Min (-1,6V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (720,0μs) 7. Rise time (4μs)
4.		Gambar 4 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 80% menghasilkan : 1. Frekuensi (1,199Khz) 2. Periode (834,0μs) 3. Mean (22,4V) 4. Min (-2,40V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (802,0μs) 7. Rise time (4μs)
5.		Gambar 5 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 90% menghasilkan : 1. Frekuensi (0) 2. Periode (0) 3. Mean (23,2V) 4. Min (22,4V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (0) 7. Rise time (0)

No	Hasil Pengujian	Keterangan
6.		Gambar 6 diset pada frekuensi 1200Hz dan <i>duty cycle</i> 100% menghasilkan : 1. Frekuensi (0) 2. Periode (0) 3. Mean (23,2V) 4. Min (22,4V) 5. Max (24,8V) 6. Pulse width (0) 7. Rise time (0)

Berdasarkan **Tabel 4.13**, pengujian dilakukan pada beban *fan blower* dengan tegangan suplai nominal 24V. Hasil pengukuran oscilloscope menunjukkan bahwa *driver* BTS7960 mampu melakukan switching PWM pada tegangan tinggi dengan amplitudo puncak (V_{max}) terpantau stabil di kisaran 24,8 V hingga 25,6 V. Bentuk gelombang output yang dihasilkan berbentuk persegi (square wave) dengan transisi rise time yang cepat ($2\ \mu s$ - $4\ \mu s$), mengindikasikan efisiensi penyalaan yang baik pada sisi daya.

Tabel 4.14. Perhitungan *Error* Pengukuran *Duty Cycle* Output BTS7960 *Fan Blower*

no	Duty (%)	Mean (V)	Pulse Width (μs)	Periode (μs)	Duty cycle Pengukuran (%)	Error (%)
1	50	15,2	552	834	66,19	32,37
2	60	17,6	636	834	76,26	27,10
3	70	20	720	834	86,33	23,33
4	80	22,4	802	834	96,16	20,20
5	90	23,2	0	0	100	11,11
6	100	23,2	0	0	100	0,00



Gambar 4.5. Grafik *Error* Pengukuran *Driver* BTS7960 *Fan Blower*

Berdasarkan **Tabel 4.14** dan **Gambar 4.5**, pengujian karakteristik respon *driver* BTS7960 pada beban *fan blower* 24V menunjukkan tren penyimpangan *error* yang konsisten dengan pengujian sebelumnya. *Error* terbesar tercatat pada pengujian *duty cycle* 50%, di mana terjadi penyimpangan sebesar 32,37% (output terukur 66,19%). Tingginya persentase *error* ini diakibatkan oleh pelebaran pulsa (pulse stretching) yang merupakan propagasi langsung dari distorsi sinyal pada tahap isolator *optocoupler*.

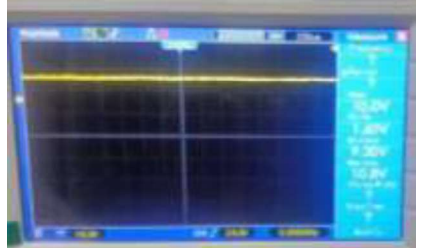
Grafik 4.4 memperlihatkan korelasi negatif yang linear antara besaran input dan persentase *error*. Semakin mendekati nilai input 100%, *error* pengukuran semakin menurun secara signifikan hingga mencapai 0%. Namun, perlu dicatat bahwa sistem mengalami saturasi dini pada input 90%. Pada titik ini, lebar pulsa terukur telah mencapai 100% (sinyal DC kontinu), yang diindikasikan oleh *error* sebesar 11,11%. Hal ini terjadi karena durasi waktu *Low* pada *input* 90% ($\pm 83 \mu s$) lebih singkat dibandingkan waktu peluruhan tegangan (decay time) sistem, sehingga *driver* gagal mendeteksi logika *Low* dan mempertahankan output pada kondisi *High* sepenuhnya.

Data ini menyimpulkan bahwa rentang kendali efektif (*effective control range*) untuk sistem *Fan Blower* ini berada pada interval input 0% hingga 85%. Input di atas 85% akan dianggap oleh aktuator sebagai perintah kecepatan maksimum (100%).

4.2.4. Pengujian Output Filter LC

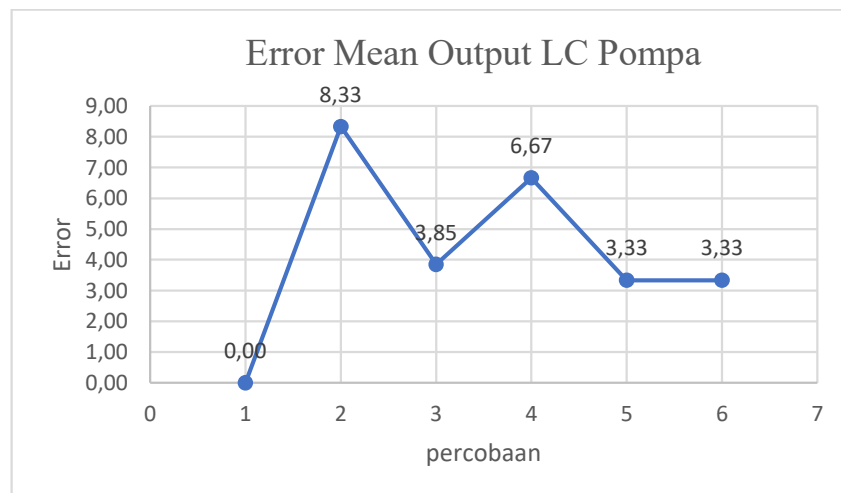
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang yang sudah di filter (diratakan) oleh rangkaian LC agar aman untuk kontrol daya aktuator *fan blower* dan pompa. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *oscilloscope* untuk memastikan gelombang sudah rata dan membandingkan keseuaian tegangan dari output BTS dan output filter LC.

Tabel 4.15. Pengujian Output Filter LC Pompa

Output BTS Pompa			Output Filter LC pompa		
No	Duty (%)	Mean (V)	Mean (V)	Error (%)	Pembacaan <i>Oscilloscope</i>
1	50	8,0	8,0	0	
2	60	9,60	8,80	8,33	
3	70	10,4	10,0	3,85	
4	80	12,0	11,2	6,67	

Output BTS Pompa			Output Filter LC pompa		Pembacaan <i>Oscilloscope</i>
No	Duty (%)	Mean (V)	Mean (V)	Error (%)	
5	90	12,0	11,6	3,33	
6	100	12,0	11,6	3,33	

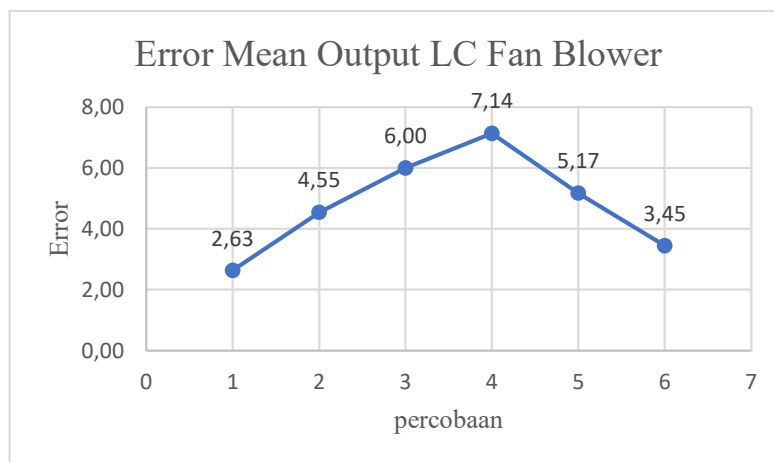
Berdasarkan data pada **Tabel 4.15**, rangkaian filter LC terbukti berhasil mengonversi sinyal PWM menjadi tegangan DC murni yang stabil, ditandai dengan bentuk gelombang osiloskop yang mendatar (flat) dan minim *ripple*. Meskipun terjadi penurunan tegangan (*voltage drop*) akibat resistansi internal induktor, penyimpangan (*error*) yang dihasilkan relatif kecil dengan nilai maksimum 8,33%, yang masih berada dalam batas toleransi wajar. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan respons yang linear seiring kenaikan *duty cycle*, dengan tegangan keluaran maksimal mencapai 11,6V yang dinilai aman dan optimal untuk operasional pompa. Untuk grafik *error* keseluruhan dapat dilihat pada **Gambar 4.6** berikut.



Gambar 4.6. Grafik *Error* Mean Tegangan Output LC Pompa**Tabel 4.16.** Pengujian Output Filter LC *Fan Blower*

Output BTS <i>Fan Blower</i>			Output LC <i>Fan Blower</i>		Hasil Percobaan
No	Duty (%)	Mean BTS (V)	Mean LC (V)	Error (%)	
1	50	15,2	14,8	2,63	
2	60	17,6	16,8	4,55	
3	70	20	18,8	6,00	
4	80	22,4	20,8	7,14	
5	90	23,2	22	5,17	
6	100	23,2	22,4	3,45	

Berdasarkan data pada **Tabel 4.16**, kinerja rangkaian filter LC pada beban *fan blower* menunjukkan hasil yang optimal. Pengamatan terhadap bentuk gelombang *osilloscope* memperlihatkan garis lurus mendatar pada seluruh variasi *duty cycle*, yang menandakan keberhasilan konversi sinyal PWM menjadi tegangan DC murni sehingga mampu menghilangkan *noise* dan panas berlebih pada motor. Di sisi lain, pengukuran data tegangan menunjukkan adanya penurunan akibat resistansi induktor dengan nilai penyimpangan (*error*) tertinggi sebesar 7,14%. Meskipun demikian, nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi wajar (di bawah 10%). Sistem juga menunjukkan respons linearitas yang baik dengan tegangan keluaran maksimal tercatat sebesar 22,4 Volt pada *duty cycle* 100%, yang dinilai sangat aman untuk operasional jangka panjang karena berada sedikit di bawah rating nominal *blower* 24 Volt. Untuk grafik data *error* secara lengkapnya dapat dilihat pada **Gambar 4.7** berikut.



Gambar 4.7. Grafik *Error Mean* Tegangan Output LC Fan Blower

4.3. Pengujian Keseluruhan Sistem Distribusi *Water Refrigeran* Dan Kontrol *Air Handling Unit* (AHU)

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan sistem distribusi *water refrigerant* dan *Air Handling Unit* (AHU) dapat bekerja seperti rancangan yang sudah dibuat meliputi kontrol kecepatan pompa dan *fan blower* dengan umpan balik sensor *waterflow* YF – S201 dan sensor suhu RTD PT100

4.3.1. Pengujian Respon Sistem Kontrol Pompa Dengan Laju Aliran *Water Refrigeran* Pada Pembacaan Sensor *Waterflow*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui performa sistem kontrol dalam menjaga kestabilan laju aliran air (*flow rate*) yang bersirkulasi pada sistem *air chiller*. Pengujian dilakukan dengan membaca nilai debit air menggunakan sensor *waterflow* YF-S201 selama rentang waktu operasi tertentu. Data hasil pengukuran direkam secara real-time dan disajikan untuk melihat karakteristik aliran yang dihasilkan oleh pompa.

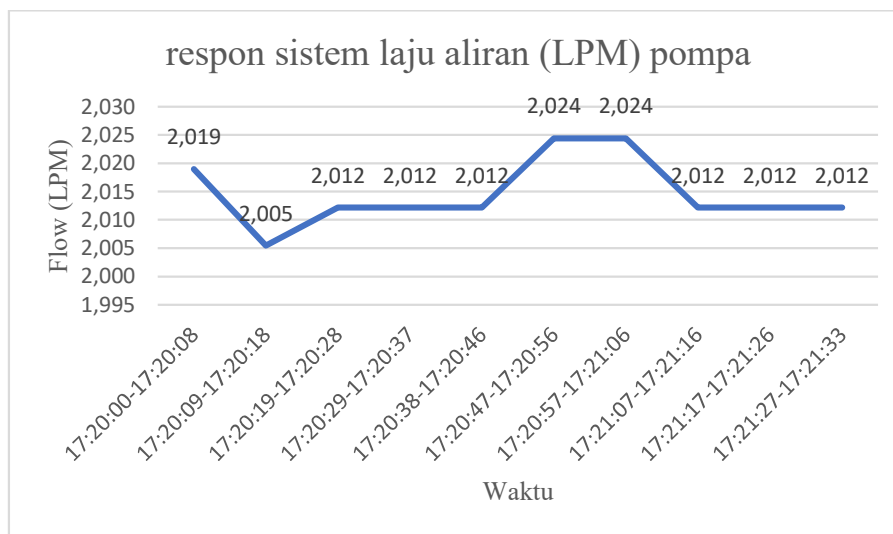
a. Hasil Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan selama kurang lebih 1,5 menit dengan interval pencatatan data setiap 8-10 detik. Berikut adalah tabel dan grafik hasil pengujian laju aliran air pada sistem:

Tabel 4.17. Data Hasil Pengujian Aliran Air

WAKTU	DATA <i>FLOW</i>
17:20:00-17:20:08	2,0190
17:20:09-17:20:18	2,0054
17:20:19-17:20:28	2,0122
17:20:29-17:20:37	2,0122
17:20:38-17:20:46	2,0122
17:20:47-17:20:56	2,0244
17:20:57-17:21:06	2,0244
17:21:07-17:21:16	2,0122
17:21:17-17:21:26	2,0122
17:21:27-17:21:33	2,0122

Berdasarkan **Tabel 4.17**, hasil pengujian aliran air, data tersebut dapat diubah ke dalam grafik respon sistem terhadap waktu seperti **Gambar 4.7** berikut:



Gambar 4.8. Grafik Respon Sistem Laju Aliran Pompa

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 3.17** dan **Gambar 4.8**, grafik respon sistem laju aliran, dapat disimpulkan bahwa nilai rata – rata yang terukur selama pengujian adalah sebesar 2,015 L/menit. Serta data laju aliran menunjukkan tingkat kestabilan yang sangat tinggi. Nilai aliran bergerak pada rentang yang sempit, yaitu antara 2,0054 L/menit (minimum) hingga 2,0244 L/menit (maksimum).

Pada sub-bab perancangan (Bab 3/Bab 2), telah dihitung bahwa kebutuhan debit air ideal untuk mencapai ΔT sebesar 10°C dengan beban kalor 1,55 kW adalah 2,21 L/menit. Namun, hasil pengujian aktual menunjukkan debit rata-rata yang dapat dicapai sistem adalah 2,015 L/menit. Terdapat deviasi (selisih) sekitar 0,21 L/menit atau penurunan performa aliran sebesar 9,5% dari target perhitungan teoritis. Perbedaan antara nilai rancangan (2,21 L/menit) dan nilai aktual (2,01 L/menit) ini disebabkan oleh faktor fisik komponen pompa dan sistem perpipaan seperti *head loss* (Kerugian Tekanan) disebabkan karena jalur perpipaan pada evaporator sistem *chiller* memiliki panjang dan lekukan yang menciptakan hambatan aliran yang signifikan, padahal pompa yang digunakan telah beroperasi pada kapasitas maksimumnya (*Duty cycle* PWM 100%), namun karena tingginya hambatan statis pada pipa kapiler/evaporator, debit maksimal yang mampu dialirkan turun dari spesifikasi pabrikan menjadi 2,01 L/menit.

Meskipun debit aktual berada di bawah target perhitungan teoritis, grafik pada **Gambar 4.7** menunjukkan bahwa sistem kontrol mampu menghasilkan aliran yang laminar dan stabil. Fluktuasi data yang sangat kecil menandakan bahwa pembacaan sensor YF-S201 melalui PLC berjalan dengan baik dan tidak terdapat gangguan (*noise*) yang signifikan atau lonjakan aliran (*surge*) yang dapat mengganggu proses pendinginan. Stabilitas aliran di angka 2,01 L/menit ini tetap dapat digunakan untuk proses pendinginan dengan konsekuensi penyesuaian pada beban pendinginan udara (kecepatan *blower*) untuk menjaga keseimbangan kalor.

4.3.2. Pengujian Speed *Fan Blower* Terhadap Suhu AHU

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem pengaturan speed *fan blower* terhadap suhu AHU yang terukur, dimana untuk setting kecepatan *fan blower* dibagi menjadi 3 kecepatan seperti pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4.18. Setpoint Speed *Fan Blower*

No	Duty (%)	Parameter suhu (°C)
1	40	$\geq 19 - \leq 22$
2	50	$\geq 22 - \leq 24$
3	60	≥ 24
4	0	≤ 19

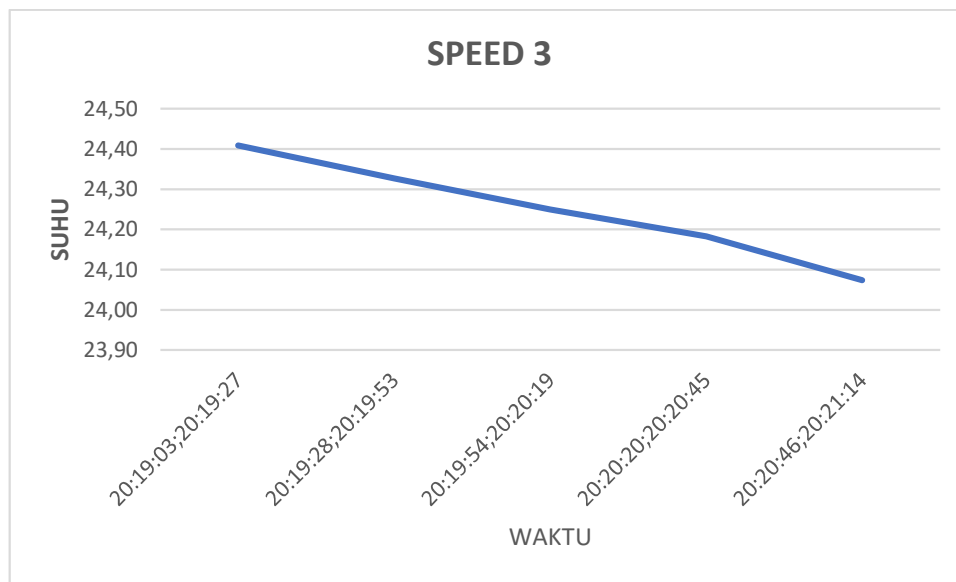
Dari pengujian yang telah dilakukan maka dibuat tabel pengujian sensor suhu terhadap waktu untuk mengetahui respons kecepatan pendinginan. Data kecepatan pendinginan dapat dilihat pada **Tabel 4.19** berikut.

Tabel 4.19. Data Respon Suhu Speed 3

No	Waktu	Suhu
1	20:19:03 - 20:19:27	24,41
2	20:19:28 - 20:19:53	24,33
3	20:19:54 - 20:20:19	24,25
4	20:20:20 - 20:20:45	24,18
5	20:20:46 - 20:21:14	24,07

Tabel 4,19, adalah data rata rata suhu yang di ambil setiap interval 26 detik, data awal yang terukur dalam waktu (20:19:03) adalah 24,41°C yang mana pada nilai suhu tersebut speed yang aktif pada sistem kontrol kecepatan *fan blower* adalah speed 3 dengan *duty cycle* 60%. Dalam waktu 2 menit 17 detik suhu turun

menuju batas bawah speed 3 pada suhu 24,07°C. menunjukkan respon sistem perpindahan suhu yang baik seperti pada **Gambar 4.9** berikut.



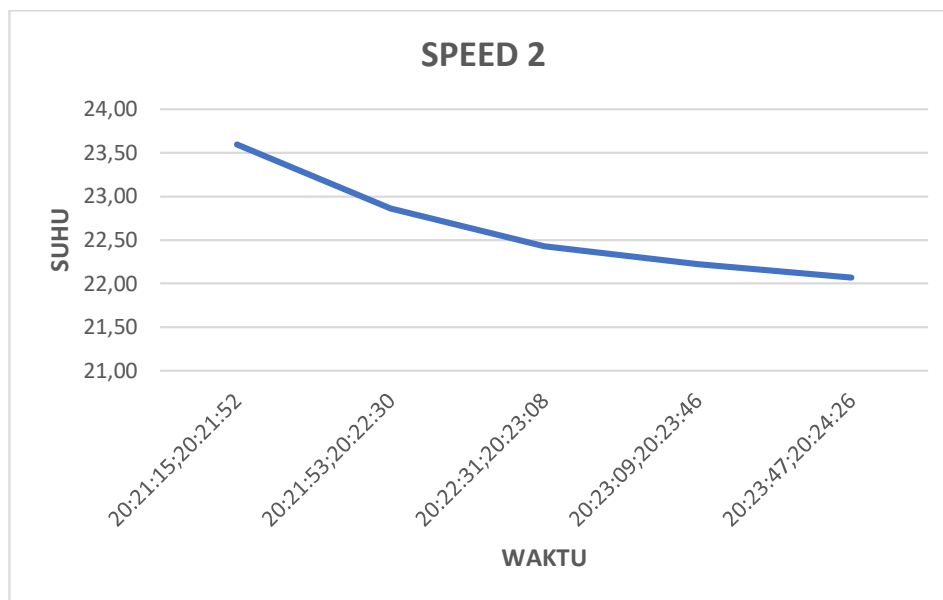
Gambar 4.9. Grafik Respon Suhu Terhadap Speed *Fan Blower* 3

Kemudian suhu turun pada batas atas suhu kontrol *fan blower* speed 2 seperti pada **Tabel 4.20**, berikut,

Tabel 4.20. Data Respon Suhu Speed 2

No	Waktu	Suhu
1	20:21:15 - 20:21:52	23,60
2	20:21:53 - 20:22:30	22,86
3	20:22:31 - 20:23:08	22,43
4	20:23:09 - 20:23:46	22,23
5	20:23:47 - 20:24:26	22,07

Tabel 4.20, adalah data rata rata yang di ambil setiap interval 38 detik sekali. Data awal yang terukur pada waktu (20:21:15) adalah (23,60°C) yang mana pada suhu tersebut adalah batas atas speed 2, pada speed 2 ini duty cycle yang aktif adalah 50% samapi pada waktu (20:24:26) suhu berada pada batas bawah speed 2 yang akan bertransisi menuju speed 1 dengan selang waktu (3 menit 41 detik). dari data tersebut menunjukan respon sistem yang cukup baik seperti pada **Gambar 4.10** berikut:



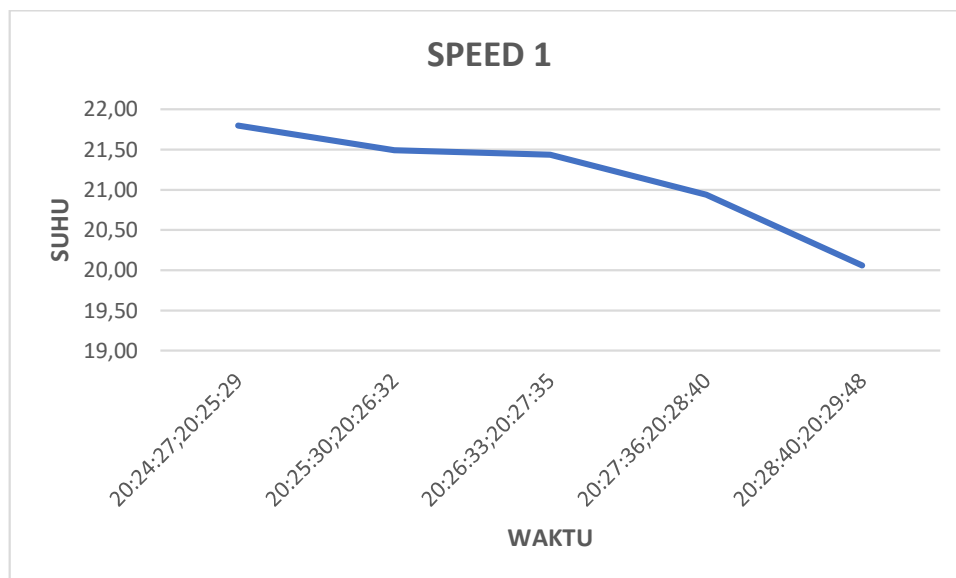
Gambar 4.10. Grafik Respon Suhu Terhadap Speed *Fan Blower* 2

Setelah suhu turun di bawah nilai 22°C pada waktu (20:24:26) transisi dari *fan blower speed* 2 ke *speed* 1 terjadi, berikut adalah respon suhu terhadap speed *fan blower* 1 pada **Tabel 4.21**.

Tabel 4.21. Data Respon Suhu Speed 1

No	Waktu	Suhu
1	20:24:27 - 20:25:29	21,80
2	20:25:30 - 20:26:32	21,49
3	20:26:33 - 20:27:35	21,43
4	20:27:36 - 20:28:40	20,94
5	20:28:40 - 20:29:48	20,06

Tabel 4.21, adalah data rata – rata yang diambil pada interval waktu 63 detik, data awal yang terukur pada waktu (20:24:27) adalah (21,80°C) lalu pada selang waktu (6 menit 15 detik) suhu turun pada batas bawah speed 1 dengan nilai suhu (20,6°C), pada speed 1 ini duty cycle yang aktif adalah 40%. kemudian jika suhu berhasil turun di bawah 19 °C maka fan blower akan mati dengan duty cycle 0%. Untuk respon suhu sistem pada speed 1 dapat dilihat pada **Gambar 4.11** berikut.



Gambar 4.11. Grafik Respon Suhu *Speed 1 Fan Blower*

Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian *speed fan blower* terhadap suhu berjalan dengan sempurna, karena sistem pengaturan kecepatan *fan blower* dengan variasi *duty cycle* dapat merespon suhu yang terukur dengan perubahan *duty cycle* sesuai setpoint yang ditetapkan.

4.3.3. Pengujian Perbandingan Respons Pendinginan Suhu Pada Coil Evaporator Primer Dan Sekunder

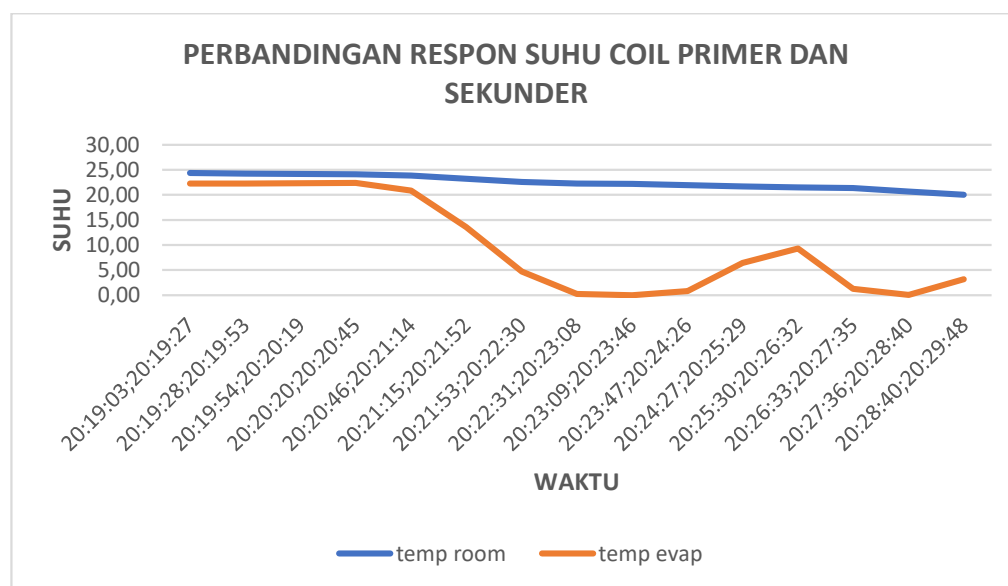
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respons laju pendinginan pada coil evaporator primer dengan refrigerant kimia dan coil evaporator sekunder pada AHU dengan air sebagai media pendinginan. Pengujian ini dilakukan dengan menjalankan mesin pada mode *auto* dengan *set point* pada evaporator (0°C) dan nilai hysteresis pada (10°C). hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.22**.

Tabel 4.22. Respons Suhu Evaporator Primer Dan Sekunder

No	Waktu	Suhu Sekunder	Suhu Primer
1	20:19:03 - 20:19:27	24,34	22,21
2	20:19:28 - 20:19:53	24,26	22,27
3	20:19:54 - 20:20:19	24,19	22,32
4	20:20:20 - 20:20:45	24,10	22,37
5	20:20:46 - 20:21:14	23,82	20,85
6	20:21:15 - 20:21:52	23,17	13,57
7	20:21:53 - 20:22:30	22,60	4,69

No	Waktu	Suhu Sekunder	Suhu Primer
8	20:22:31 - 20:23:08	22,30	0,29
9	20:23:09 - 20:23:46	22,15	0,00
10	20:23:47 - 20:24:26	21,98	0,81
11	20:24:27 - 20:25:29	21,69	6,42
12	20:25:30 - 20:26:32	21,47	9,31
13	20:26:33 - 20:27:35	21,38	1,29
14	20:27:36 - 20:28:40	20,62	0,07
15	20:28:40 - 20:29:48	20,01	3,19

Berdasarkan data pada **Tabel 4.22**, sistem kendali otomatis berhasil mengintegrasikan performa pendinginan antara evaporator primer dan sekunder secara efektif. Sisi primer terbukti mampu mencapai *setpoint* 0°C pada data ke-9 dan beroperasi stabil dalam siklus *hysteresis*, di mana sistem kembali aktif melakukan pendinginan setelah suhu meningkat hingga 9,31°C pada data ke-12. Sementara itu, suhu ruangan pada sisi sekunder menunjukkan penurunan yang konsisten dari 24,34°C hingga menyentuh 20,01°C melalui pengaturan variasi duty cycle fan blower (60% ke 40%) dan laju aliran air maksimal 2 LPM. Hasil ini mengonfirmasi bahwa logika pemrograman PLC berhasil menjaga stabilitas termal sistem Chiller-AHU sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Perbandingan hasil respons sistem dapat dilihat pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4.12. Grafik Perbandingan Respons Suhu Evaporator

4.4. Analisa Pengujian

Hasil pengujian catu daya yang menggunakan *power supply* 24VDC 5A dan modul stepdown LM2596 dengan keluaran 12VDC menunjukkan performa yang stabil terhadap variasi beban, tegangan keluaran mampu mendekati nilai nominal, tetapi pada beban yang terlalu kecil nilai efisiensi bisa drop sampai 1% tetapi nilai efisiensi meningkat jika pada beban normal dan tinggi, hal ini disebabkan karena pada saat tidak ada beban konsumsi daya dari stepdown tetap ada sebesar 1 watt sehingga nilai efisiensi menjadi drop saat beban kecil.

Pengujian pada PLC TM241CE24T dilakukan melalui program ladder uji coba sederhana berupa pembacaan input digital (I0) dengan *push button*, hasil pengujian menunjukan PLC dapat bekerja dengan baik dan dapat mengeksekusi instruksi sesuai program ladder yang diberikan.

Pengujian pada pompa DC menunjukan bahwa pompa dapat mengalirkan air menuju coil AHU melewati sensor *waterflow* dengan sempurna tetapi hasil pengujian menunjukan nilai ampere yang tidak sesuai dengan datasheet, tetapi setelah diuji dalam kurun waktu 10 menit pompa masih menunjukan laju aliran yang stabil dan suhu normal.

Pengujian pada *fan blower* menunjukan bahwa *fan blower* bekerja dengan semestinya dengan arus atarting tertinggi pada (1,65A) dan stabil pada (1,44A) ini menunjukan tidak ada lonjakan arus yang berlebihan dan *fan blower* dapat bekerja dengan semstinya.

Pengujian pada sensor *waterflow* YF – S201 dilakukan untuk memastikan keakuratan pembacaan sensor dengan input pembacaan PLC dengan cara membandingkan data kalibrasi untuk laju aliran pada 2 liter per detik menghasilkan frekuensi 17Hz sesuai perhitungan dan pembuktian dengan pengukuran osiloskop dan pembacaan *software machine expert* menghasilkan data yang sama. Sehingga dapat dimunpulkan bahwa sensor *waterflow* dapat bekerja dengan sempurna.

Pengujian pada sensor RTD PT100 dilakukan untuk membuktikan dan membandingkan keakuratan pembacaan sensor dengan suhu sebenarnya, pengujian

menunjukkan hasil pembacaan sensor akurat pada suhu (27,15°C) sesuai dengan alat ukur thermometer digital yang menunjukkan suhu (27,10) hanya selisih *error* (0,0020321%).

Hasil pengujian output PWM PLC menunjukkan performa yang sangat presisi dan stabil. Frekuensi keluaran konsisten di sekitar 1200 Hz dengan *error* maksimum hanya 0,08%, sedangkan *error duty cycle* tertinggi tercatat sebesar 0,24%. Linearitas tegangan rata-rata terhadap *duty cycle* membuktikan bahwa modul PWM PLC bekerja ideal sebagai pengendali daya aktuator. Dengan tingkat akurasi yang tinggi ini, PLC dinilai sangat andal untuk mengatur kecepatan pompa dan *fan blower*.

Pengujian *optocoupler* menunjukkan adanya distorsi signifikan pada *duty cycle*, terutama pada nilai rendah. *Duty cycle* input 50% terukur menjadi 65,71% dengan *error* 31,41%, akibat fenomena slow discharge pada fase fall time. Distorsi ini menyebabkan pelebaran pulsa karena tegangan tidak langsung turun ke 0 V. Meskipun demikian, pola *error* yang linear dan deterministik memungkinkan penerapan kompensasi perangkat lunak, sehingga sistem tetap dapat digunakan dengan tingkat presisi yang dapat dikendalikan.

Hasil pengujian *driver* BTS7960 pada pompa dan *fan blower* menunjukkan bahwa *driver* mampu merekonstruksi sinyal PWM menjadi gelombang kotak yang tajam dan stabil. Namun, *error duty cycle* yang terjadi merupakan propagasi langsung dari distorsi *optocoupler*, dengan *error* maksimum mencapai 32,37% pada *duty cycle* 50%. Selain itu, terjadi saturasi pada input di atas 90%, yang menyebabkan aktuator bekerja pada kapasitas penuh. Temuan ini menegaskan bahwa rentang kendali efektif sistem berada pada *duty cycle* hingga sekitar 85%.

Hasil pengujian pada rangkaian filter LC berhasil mengonversi sinyal PWM menjadi tegangan DC murni dengan ripple yang sangat kecil. Penurunan tegangan akibat resistansi induktor menghasilkan *error* maksimum 8,33% pada pompa dan 7,14% pada *fan blower*, yang masih berada dalam batas toleransi. Respons tegangan yang linear terhadap *duty cycle* menunjukkan bahwa filter LC efektif dan aman untuk digunakan dalam pengendalian aktuator DC.

Hasil pengujian pada laju aliran *water* refrigeran menunjukkan debit air rata-rata sebesar 2,015 L/menit dengan fluktuasi sangat kecil antara 2,0054 hingga 2,0244 L/menit. Meskipun nilai ini lebih rendah 9,5% dibandingkan perhitungan teoritis 2,21 L/menit, stabilitas aliran yang tinggi menunjukkan sistem kontrol pompa bekerja optimal. Perbedaan ini disebabkan oleh head loss pada pipa dan evaporator, bukan oleh kegagalan sistem kontrol.

Hasil pengujian sistem kontrol kecepatan *fan blower* mampu merespon perubahan suhu AHU secara bertahap dan sesuai setpoint. Penurunan suhu dari 24,4 °C ke 19,9 °C diikuti dengan transisi *duty cycle* dari 60%, 50%, hingga 40%. Respons ini menunjukkan bahwa integrasi sensor suhu, PLC, dan aktuator berjalan dengan baik, sehingga sistem mampu menjaga kestabilan suhu ruangan secara otomatis dan efisien.

Hasil pengujian perbandingan respons pendinginan suhu sekunder dan primer berhasil mencapai target pendinginan melalui integrasi kontrol primer dan sekunder yang efektif. Evaporator primer bekerja stabil sesuai algoritma hysteresis 10°C, berfluktuasi antara 0°C hingga 9,31°C untuk menjaga efisiensi mesin. Sementara itu, suhu ruangan menurun secara linear dari 24,34°C ke 20,01°C berkat kombinasi aliran air 2 LPM dan *duty cycle fan* yang adaptif. Meskipun suhu primer berfluktuasi, inersia termal pada media air memastikan distribusi pendinginan pada AHU tetap konsisten dan stabil.