

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

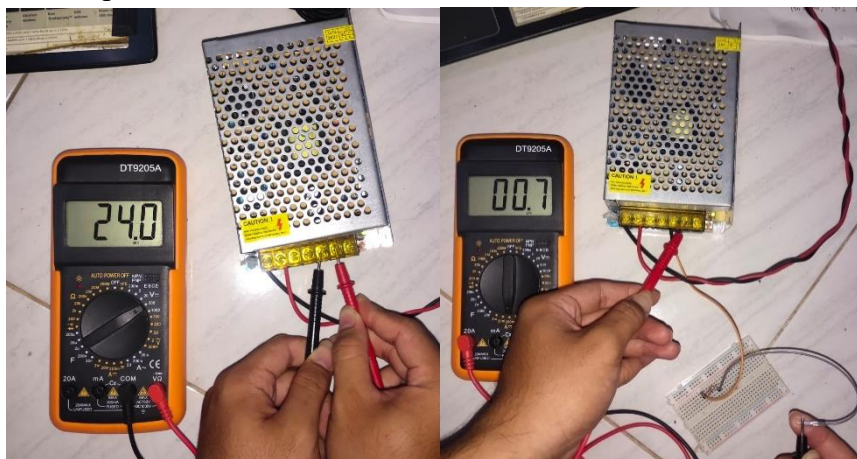
Bab ini akan membahas hasil pengujian sistem refrigeran *mini air cooled chiller* yang telah dirancang. Analisis dilakukan terhadap parameter suhu dan tekanan yang dikontrol oleh PLC, serta akurasi pembacaan dari sensor RTD PT100 dan Wisner WPT-71G Series. Pembahasan difokuskan pada performa sistem, kestabilan operasional, dan efisiensi pendinginan yang dihasilkan.

4.1 Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Pengujian dimulai dengan uji fungsionalitas komponen, lalu akan dilanjutkan pengujian sistem refrigerasi baru dilakukan uji keseluruhan sistem untuk memvalidasi bahwa setiap bagian dari sistem berfungsi sesuai rancangan sebelum pengambilan data.

4.1.1 Pengujian Catu Daya 220 V AC dan Power Supply 24 VDC 5A

Pengujian catu daya 220 VAC dilakukan untuk memastikan kestabilan sumber listrik utama 220 VAC dari PLN yang menjadi input bagi seluruh sistem serta untuk memvalidasi performa *Power Supply* (PSU) 24 VDC dalam mengubah tegangan AC tersebut menjadi tegangan DC yang stabil dan untuk memastikan tegangan keluaran yang menyuplai seluruh rangkaian kontrol (PLC, sensor, relay) bersifat stabil dan tidak mengalami *over-voltage* atau *under-voltage* yang dapat merusak komponen.



Gambar 4.1 Pengujian Catu Daya 220 V AC dan PSU 24 V DC

Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi keandalan sumber daya utama sistem kontrol. Proses pengujian, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1**, pengukuran tegangan output SMPS menggunakan multimeter digital pada kondisi dengan beban berupa resistor dan diukur untuk nilai arus dengan multimeter dan teoritis. Berikut hasil pengukuran yang pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Tabel Pengujian Catu Daya 220 V AC dan *Power Supply* 24 V DC

Catu Daya 220 V AC		<i>Power Supply</i> 24 V DC				Error (%)
<i>V_{in}</i> (V)	<i>V_{out}</i> (V)	R (Ω)	<i>I_{out}</i> teori (A)	<i>I_{out}</i> Ukur (A)	<i>P_{out}</i> (watt)	
233	24	470	0,051	0,05	1,2	1,96
233	24	330	0,072	0,07	1,68	2,78
233	24	220	0,109	0,11	2,64	0,92
233	24	180	0,13	0,13	3,12	0,0
233	24	100	0,24	0,24	5,76	0,0
Rata-rata error (%)						1,132

Berdasarkan pengujian **Tabel 4.1** yang dilakukan dengan catu daya terukur konstan di 233 V AC dan tegangan *power supply* terukur di 24 V DC yang menunjukkan regulasi tegangan dari *power supply* baik dalam menjaga stabilitas tegangan suplai untuk sistem kontrol. Pengujian dilanjutkan dengan lima variasi beban resistif mulai dari 470 Ω hingga 100 Ω didapati hasil perbandingan arus keluaran (*I_{out}*) dan menunjukkan error dari hasil pengukuran dan teori dengan rata-rata error 1,132%. Dari beberapa pengujian tersebut menunjukkan bahwa *power supply* 24 V DC memiliki karakteristik stabil dan presisi digunakan sebagai sumber daya untuk sistem kontrol.

4.1.2 Pengujian PLC TM241CE24T dan Modul Analog TM3AI8

Pengujian PLC TM241CE24T dan modul analog TM3AI8 dimulai dengan koneksi antara kedua perangkat. Kedua perangkat ini dapat terhubung dengan menghubungkan konektok bus I/O paralel bawaan yang disediakan oleh Schneider seperti pada **Gambar 4.2**.



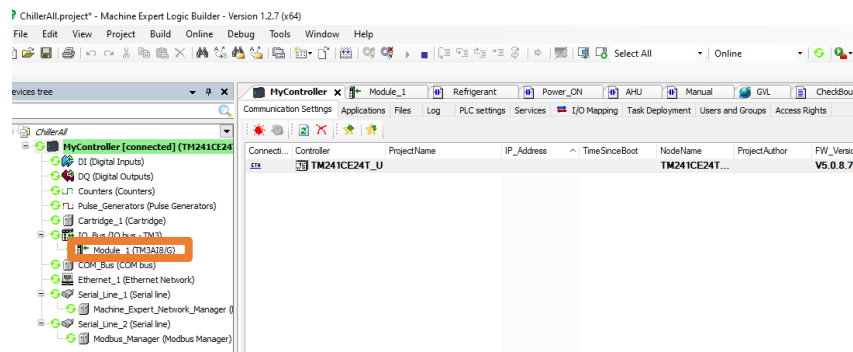
Gambar 4.2 Koneksi Bus I/O Paralel PLC TM241CE24T dan Modul TM3AI8

Pada **Gambar 4.2** data dari modul analog akan ditransfer melalui komunikasi bus I/O tersebut sehingga PLC dapat memproses data dari modul TM3AI8. Namun untuk suplai tegangan dari kedua perangkat ini terpisah sehingga untuk PLC TM241CE24T dan Modul TM3AI8 harus diberi suplai tegangan 24V DC. Lalu dilakukan pengujian fungsionalitas untuk kedua perangkat tersebut dan juga dilakukan pengecekan I/O pada PLC dengan mentransfer program ladder sederhana dengan hasil seperti pada **Gambar 4.3** berikut.



Gambar 4.3 Pengujian Koneksi Perangkat PLC TM241CE24T dan Modul TM3AI8

Dari pengujian pada **Gambar 4.3** kedua perangkat sudah menyala dan untuk keseluruhan I/O pada PLC berfungsi normal. Lalu untuk mengkonfirmasi apakah kedua perangkat tersebut sudah terhubung dilakukan pengecekan pada *software EcoStruxure Machine Expert* seperti pada **Gambar 4.4** berikut.



Gambar 4.4 Pengecekan Pada Software EcoStruxure Machine Expert

Pada **Gambar 4.4** diketahui bahwa modul TM3AI8 dapat dideteksi oleh *EcoStruxure Machine Expert* sehingga data dari modul TM3AI8 dapat diproses PLC TM241CE24T. Seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 2.7.2 bahwa modul TM3AI8 memiliki resolusi 12-bit atau dalam nilai ADC 0 hingga 4095 yang nantinya akan disimpan dalam variabel PLC bertipe data INT (*Signed Integer*) 16-bit. Dan untuk inputnya berjumlah 8 (IW0-IW7) yang dapat dikonfigurasi pada *software EcoStruxure Machine Expert* seperti pada **Gambar 4.5**.

Parameter	Type	Value	Default Value	Unit	Description
IW0					
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...32766)	0	-32768		Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	32767	32767		Maximum value
InputFilter	INT(0...1000)	0	0 x 10 ms		Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	1	1 ms/Channel		Input sampling selection
IW1					
Type	Enumeration of BYTE	0 - 20 mA	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...32766)	0	-32768		Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	32767	32767		Maximum value
InputFilter	INT(0...1000)	0	0 x 10 ms		Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	1	1 ms/Channel		Input sampling selection
IW2					
Type	Enumeration of BYTE	0 - 10 V	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...32766)	0	-32768		Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	32767	32767		Maximum value
InputFilter	INT(0...1000)	0	0 x 10 ms		Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	1	1 ms/Channel		Input sampling selection
IW3					
Type	Enumeration of BYTE	-10 - +10 V	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...32766)	-32767	-32768		Minimum value
Maximum	INT(-32766...32767)	32767	32767		Maximum value

Gambar 4.5 Konfigurasi Input Modul Analog TM3AI8

Konfigurasi sesuai pada **Gambar 4.5** mencakup empat tipe masukan sensor, yaitu 4-20 mA, 0-20 mA, 0-10 V, (-10)-(+10) V menyesuaikan sensor analog yang digunakan. Lalu ada nilai minimum dan maksimum (data tipe INT, -32767 sampai 32767), ada filter kepresisian pembacaan (data tipe INT, 0 hingga 1000), ada *sampling* untuk mengambil data *average* beberapa pembacaan nilai sensor (ada dua, 1 dan 10 data) baru data tersebut akan di scaling sesuai rentang pembacaan sensor.

4.1.3 Pengujian Relay LY2N

Pengujian relay dilakukan untuk mengetahui apakah relay berfungsi dengan baik dan dapat mengalirkan sumber AC ke beban berupa kompresor dan fan kondensor. Dalam pengujian untuk sistem refrigerasi *mini water chiller* ini digunakan 2 buah relay LY2N dijabarkan sebagai berikut

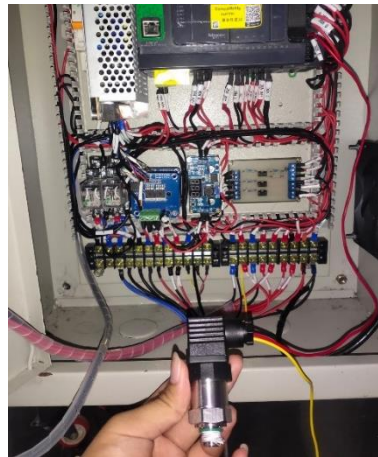
Tabel 4.2 Tabel Hasil Pengujian Relat LY2N

Relay	Gambar Pengujian	Kondisi	Tegangan Coil	Output Kontak
Kompresor		<i>True</i>	24 V DC	NC (220 V AC)
		<i>False</i>	0 V DC	NO (0 V AC)
Fan Kondensor		<i>True</i>	24 V DC	NC (220 V AC)
		<i>False</i>	0 V DC	NO (0 V AC)

Dari hasil pengujian pada **Tabel 4.2** relay kompresor dan fan kondensor diuji dengan input tegangan input 24 V DC dengan dua kondisi output PLC bernilai *True* dan *False* serta kontak *coil* relay dialiri tegangan 220 V AC. Kontak *coil* yang digunakan pada terminal 5 dan 3 dengan kondisi awal NO. Berdasarkan **Tabel 4.2** ketika relay kompresor dan fan kondensor diberi kondisi *True*, kedua relay aktif dan kontak dengan kondisi awal NO menjadi NC lalu dapat mengalirkan tegangan 220 V AC dan sebaliknya ketika kondisi bernilai *False*. Dari pengujian tersebut didapati bahwa seluruh komponen relay berfungsi dengan baik.

4.1.4 Pengujian Sensor Tekanan Wisner WPT-71G Series

Pengujian fungsionalitas sensor tekanan Wisner WPT-71G dilakukan untuk kalibrasi serta mengetahui akurasi awal sensor. Pengujian dimulai dengan melakukan wiring sensor Wisner WPT-71G ke modul analog TM3AI8 sesuai subbab 3.5.2 tentang perancangan elektrik dan ditunjukkan pada **Gambar 4.6** berikut:



Gambar 4.6 Wiring sensor Wisner WPT-71G

Setelah wiring sesuai lalu konfigurasi pada *software EcoStruxure Machine Expert* sesuai dengan spesifikasi sensor Wisner WPT-71G, tertera pada **Gambar 4.7**.

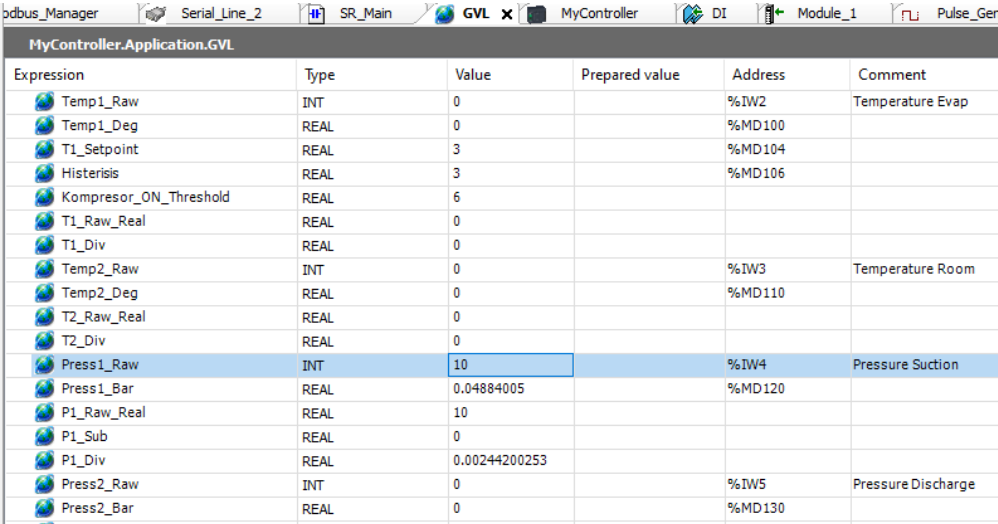
IW3					
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...4094)	0	-32768		Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	4095	32767		Maximum value
InputFilter	INT(0..1000)	100	0 x 10 ms		Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	10	1 ms/Channel		Input sampling selection
IW4					
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used		Range mode
Minimum	INT(-32768...4094)	0	-32768		Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	4095	32767		Maximum value
InputFilter	INT(0..1000)	100	0 x 10 ms		Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	10	1 ms/Channel		Input sampling selection

Gambar 4.7 Konfigurasi sensor Wisner WPT-71G

Sesuai dengan pengalamatan pada tabel 3.2 sensor tekanan Wisner WPT-71G terletak pada channel IW3 (*addres %IW5*) dan IW4 (*addres %IW6*). Tipe input diatur ke 4 - 20 mA agar sesuai dengan sinyal keluaran standar dari *transmitter* sensor tekanan. Untuk konfigurasi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7** nilai resolusi ADC Minimum dan Maximum diatur ke 0 dan 4095, yang memetakan sinyal input terhadap resolusi penuh 12-bit dari modul TM3AI8. Selanjutnya,

InputFilter diatur ke nilai 100. Sesuai dengan unit x 10 ms, ini mengaplikasikan sebuah filter digital *low-pass* dengan konstanta waktu 1000 ms (1 detik) untuk menjaga stabilitas sinyal dan meredam fluktuasi *noise* yang cepat. Terakhir, parameter Sampling diatur ke 10, yang dengan unit 1 ms/Channel, menetapkan bahwa modul akan mengambil 10 sampel data mentah (1 ms untuk 1 data) dan kemudian mengambil nilai rata-ratanya (*averages*) untuk menghasilkan data baru yang akan diproses di dalam PLC.

Sensor tekanan Wisner WPT-71G merupakan perangkat *fixed-range* yang kalibrasinya telah diatur secara permanen oleh pabrikan. Maka dari itu pengujian fungsionalitas dilakukan untuk memvalidasi akurasi dan mengidentifikasi nilai *zero offset*. Mengetahui nilai *offset* ini sangat penting untuk memastikan bahwa data tekanan yang digunakan oleh logika PLC telah secara akurat merepresentasikan kondisi fisik yang sebenarnya di dalam sistem.



Expression	Type	Value	Prepared value	Address	Comment
Temp1_Raw	INT	0		%IW2	Temperature Evap
Temp1_Deg	REAL	0		%MD100	
T1_Setpoint	REAL	3		%MD104	
Histerisis	REAL	3		%MD106	
Kompresor_ON_Threshold	REAL	6			
T1_Raw_Real	REAL	0			
T1_Div	REAL	0			
Temp2_Raw	INT	0		%IW3	Temperature Room
Temp2_Deg	REAL	0		%MD110	
T2_Raw_Real	REAL	0			
T2_Div	REAL	0			
Press1_Raw	INT	10		%IW4	Pressure Suction
Press1_Bar	REAL	0.04884005		%MD120	
P1_Raw_Real	REAL	10			
P1_Sub	REAL	0			
P1_Div	REAL	0.00244200253			
Press2_Raw	INT	0		%IW5	Pressure Discharge
Press2_Bar	REAL	0		%MD130	

Gambar 4.8 Hasil scalling Pembacaan Sensor Wisner WPT-71G

Berdasarkan **Gambar 4.8** pengujian dilakukan pada kondisi tekanan atmosfer (sensor tidak terhubung ke sistem bertekanan), sehingga nilai acuan adalah 0 bar gauge. Pada kondisi tersebut hasil pembacaan pada *Press1_Raw* adalah 10 dan setelah dilakukan proses scalling pada *Press1_Bar* nilainya menjadi 0,04884005 bar. Nilai inilah yang menjadi *absolute error* atau *zero offset* dari pengukuran sensor. Dari data tersebut untuk mengevaluasi akurasi titik nol adalah error sebagai persentase dari skala penuh (% *Full Scale*). Untuk sensor Wisner WPT-71G yang

digunakan memiliki rentang skala 20 bar untuk bagian suction kompresor dan 25 bar untuk bagian discharge kompresor. Sensor dengan rentang skala penuh 20 bar dihitung error sesuai rumus 2.17 berikut :

$$Error (\%FS) = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai skala penuh}} \times 100\%$$

$$Error (\%FS) = \frac{(0,04884005 - 0,0)}{20,0} \times 100\%$$

$$Error (\%FS) = 0,244\%$$

Lalu untuk pembacaan *Press2_Bar* nilainya 0,06105006 dan untuk error sebagai persentase dari skala penuh (% *Full Scale*) dengan rentang skala penuh sensor adalah 25 bar dan sesuai rumus 2.17 berikut:

$$Error (\%FS) = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai skala penuh}} \times 100\%$$

$$Error (\%FS) = \frac{(0,073260 - 0,0)}{25,0} \times 100\%$$

$$Error (\%FS) = 0,293\%$$

Dari kedua sensor hasil perhitungan menunjukkan *error* yang sangat kecil, yaitu pada sensor Wisner WPT-71G dengan spesifikasi 20 bar hanya 0.244% dari skala penuh, lalu untuk sensor Wisner WPT-71G dengan spesifikasi 25 bar didapati error 0,293%. *Offset* yang rendah ini membuktikan bahwa sensor Wisner WPT-71G dan logika *scaling* di PLC memiliki akurasi dan ketelitian tinggi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor tekanan telah divalidasi dan dapat digunakan untuk pengambilan data.

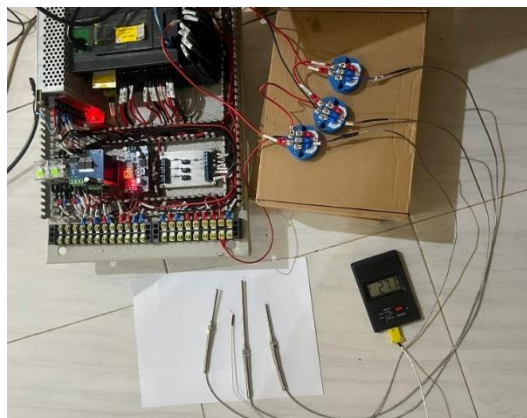
4.1.5 Pengujian Sensor Suhu RTD PT100

Pengujian fungsionalitas sensor suhu RTD PT100 dimulai dengan kalibrasi pada bagian transmitter RTD untuk mengatur keluaran arus yang dibaca modul TM3AI8. Kalibrasi dilakukan dengan melakukan perbandingan hasil pengukuran suhu dengan alat ukur digital thermometer TM-902C. Sebelum pengujian, dilakukan konfigurasi awal pada software *Machine Expert* seperti pada **Gambar 4.9** dibawah.

Optional module	Enumeration of BYTE	No	No	
Inputs				
IW0				
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used	Range mode
Minimum	INT(-32768...4094)	0	-32768	Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	4095	32767	Maximum value
InputFilter	INT(0..1000)	1000	0 x 10 ms	Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	10	1 ms/Channel	Input sampling selection
IW1				
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used	Range mode
Minimum	INT(-32768...4094)	0	-32768	Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	4095	32767	Maximum value
InputFilter	INT(0..1000)	1000	0 x 10 ms	Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	10	1 ms/Channel	Input sampling selection
IW2				
Type	Enumeration of BYTE	4 - 20 mA	Not used	Range mode
Minimum	INT(-32768...4094)	0	-32768	Minimum value
Maximum	INT(1...32767)	4095	32767	Maximum value
InputFilter	INT(0..1000)	1000	0 x 10 ms	Input filter
Sampling	Enumeration of BYTE	10	1 ms/Channel	Input sampling selection

Gambar 4.9 Konfigurasi Input Analog Sensor Suhu RTD PT100

Sesuai **Tabel 3.2** pengalaman sensor suhu RTD PT100 untuk evaporator dan kondensor terletak pada channel IW0 (*addres %IW2*) dan IW2 (*addres %IW4*) dengan tipe input 4 - 20 mA agar sesuai dengan sinyal keluaran dari *transmitter* sensor suhu RTD PT100. Untuk konfigurasi sesuai dengan **Gambar 4.9** dengan nilai resolusi ADC 0 hingga 4095 menyesuaikan nilai resolusi modul TM3AI8, lalu untuk input filter diatur ke nilai maksimal (1000) yang mengaplikasikan filter low-pass untuk stabilitas sinyal dan meredam fluktuasi sinyal dari *noise*. Untuk parameter *sampling* diatur ke 10 dengan unit 1 ms/channel untuk menetapkan periode pengambilan data dimana modul akan mengambil 10 sampel data mentah (1 ms untuk 1 data) kemudian diambil nilai *averages* yang menghasilkan data baru untuk diproses di dalam PLC.



Gambar 4.10 Wiring Kalibrasi Sensor PT100 Dengan Digital Thermometer TM-902C

Pada **Gambar 4.10** merupakan proses validasi fungsional dan kalibrasi suhu RTD PT100 yang terhubung ke terminal input modul analog TM3AI8 pada panel PLC. Acuan kalibrasi yang digunakan penulis adalah termometer digital TM-902C dengan probe *thermocouple* tipe-K dengan suhu ruang dan didapati hasil pembacaan 27,1°C. Kalibrasi manual dilakukan pada *transmitter* RTD yang memiliki dua VR (*Variable Resistor*) untuk *zero* (mengatur titik nol pada suhu 0°C) dan *span* (mengatur rentang pembacaan sensor). Dengan hasil pembacaan dijabarkan pada **Gambar 4.11**.

Expression	Type	Value	Prepared value	Address	Comment
ADC_12bit	REAL	4095			Parameter Scaling
Scale_Deg	REAL	100			
Scale_Bar	REAL	20			
Temp1_Raw	INT	1112		%IW2	Temperature Evap
Temp1_Deg	REAL	27.15507		%MD100	
T1_Setpoint	REAL	3		%MD104	
Histerisis	REAL	3		%MD106	
Kompresor_ON_Threshold	REAL	6			
T1_Raw_Real	REAL	1112			
T1_Div	REAL	0.2715507			
Temp3_Raw	INT	1112		%IW4	Temperature Kondensor
Temp3_Deg	REAL	27.15507		%MD108	
T3_Raw_Real	REAL	1112			
T3_Div	REAL	0.2715507			
Temp2_Raw	INT	1113		%IW3	Temperature Room
Temp2_Deg	REAL	27.17949		%MD110	
T2_Raw_Real	REAL	1113			
T2_Div	REAL	0.2717949			
Press1_Raw	INT	0		%IW5	Pressure Suction
Press1_Bar	REAL	0		%MD120	
P1_Raw_Real	REAL	0			
P1_Div	REAL	0			

Gambar 4.11 Hasil Scalling Pembacaan Sensor PT100 Setelah Proses Kalibrasi

Hasil kalibrasi pada **Gambar 4.11** menunjukkan nilai scalling pada *Temp1_Deg*, *Temp2_Deg*, *Temp3_Deg* yaitu 27,17949°C (bertipe data REAL). Nilai tersebut mendekati nilai hasil pembacaan termometer digital yaitu 27,1°C dimana perbedaan tersebut terjadi karena resolusi dan ketelitian konversi data ADC 12-bit ke tipe data REAL (*floating*) saat proses *scalling*, sehingga persentase error dari perbandingan data tersebut sesuai rumus yaitu:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai referensi}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{(27,179449 - 27,1)}{27,1} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,293\%$$

Hasil tersebut menyatakan bahwa pembacaan sensor memiliki akurasi tinggi dengan error 0,293% sehingga dapat digunakan dalam pengambilan data penelitian.

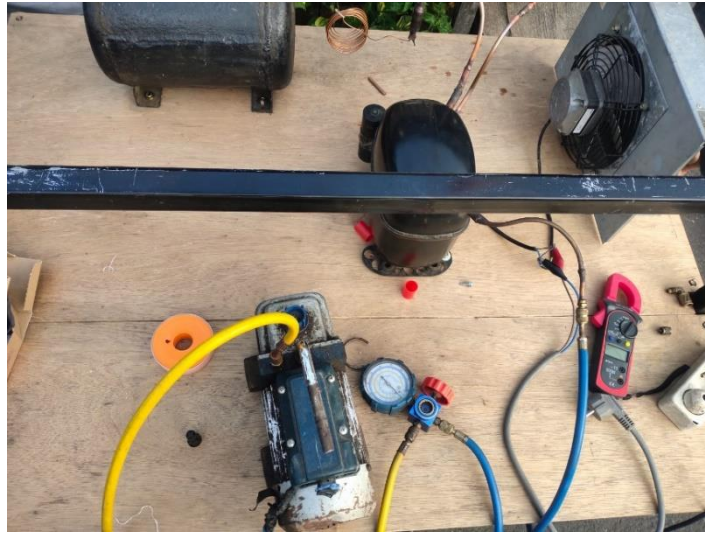
4.2 Pengujian Sistem Refrigerasi

Setelah dilakukan uji fungsionalitas tiap komponen, dilanjutkan dengan pengujian sistem refrigerasi yang telah disusun sesuai **Gambar 3.9** tentang skematik diagram P&ID sistem refrigerasi. Pengujian ini dilakukan dengan mengoperasikan sistem secara kontinu tanpa kontrol yang mana kompresor dan fan kondensor langsung dihubungkan dengan 220 VAC. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik, dan performa siklus termodinamika, serta mengetahui kinerja aktual dari sistem yang dirancang. Sebelum dilakukan pengujian sistem refrigerasi ada beberapa tahap yang harus dilakukan untuk memastikan sistem refrigerasi dapat berjalan, yaitu proses vakum dan pengisian refrigeran sehingga sistem refrigerasi dapat berjalan.

4.2.1 Proses Vakum

Proses vakum dalam sistem refrigerasi memiliki tujuan yang pertama yaitu untuk membersihkan udara dan *non-condensable gas* (gas yang tidak bisa berkondensasi). Udara ataupun gas yang terperangkap di dalam sistem akan menyebabkan *overheating* kompresor dan menyebabkan tekanan naik drastis pada sisi kondensor sehingga efisiensi pendinginan menurun. Tujuan yang kedua yaitu menghilangkan uap air/kelembapan dalam sistem. Adanya uap air dalam sistem akan menyebabkan *freezing* sehingga dapat menyumbat ketika tekanan rendah pada pipa kapiler. Tujuan yang ketiga yaitu sebagai tes kebocoran pipa, jika tidak ada kebocoran maka jarum manifold akan tetap stabil dan sebaliknya jika terjadi kebocoran maka jarum vakum pada manifold akan perlahan naik.

Dalam proses vakum ini digunakan *vacuum pump* dan juga *single manifold two way*. *Intake* vakum akan dihubungkan ke selang kuning manifold, untuk selang biru akan dihubungkan ke *suction* kompresor yang digunakan untuk pengisian refrigeran seperti pada **Gambar 4.12**, lalu buka katup manifold dan nyalakan vakum dan biarkan sekitar 20 menit untuk memastikan seluruh udara lembab dan gas tak terkondensasi (*non-condensable gas*) terbuang sempurna dari sistem atau jarum manifold mencapai titik terendah, yaitu -1 Bar (Tekanan Vakum Sempurna pada Gauge) dan itu juga menandakan bahwa sistem tidak mengalami kebocoran.



Gambar 4.12 Proses Vakum Sistem Refrigerasi

Setelah dilakukan vakum sehingga tidak ada udara yang terperangkap dalam sistem lalu dilakukan pengujian arus pada Kompresor Secop SC15CL dan fan kondensor M4Q045-CA03-51 ketika belum ada beban refrigeran dengan menggunakan tang ampere seperti ditampilkan pada **Gambar 4.13** dan **Tabel 4.3**.



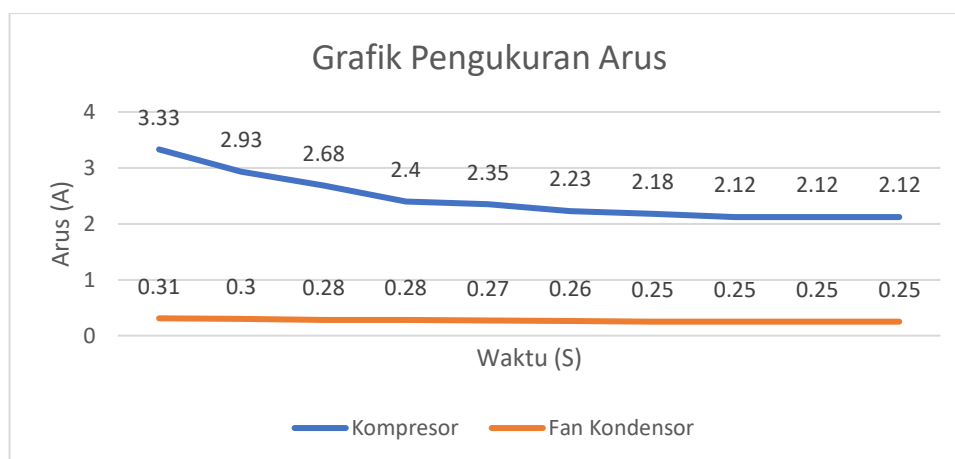
Gambar 4.13 Proses Pengukuran Arus Kompresor dan Fan Kondensor

Pada **Gambar 4.13** dilakukan pengukuran menggunakan tang ampere untuk mengetahui apakah komponen refrigerasi ini masih normal sesuai spesifikasi sehingga dapat digunakan. Hasil pengujian tersebut dijabarkan pada Tabel 4.3 tentang pengukuran arus kompresor dan fan kondensor.

Tabel 4.3 Tabel Pengukuran Arus Kompresor dan Fan Kondensor

Kompresor (A)	Fan Kondensor (A)
3,33	0,31
2,93	0,30
2,68	0,28
2,4	0,28
2,35	0,27
2,23	0,26
2,18	0,25
2,12	0,25
2,12	0,25
2,12	0,25

Berdasarkan data **Tabel 4.3** diatas, arus starting kompresor berada di 3,33 A hingga stabil pada 2,12 A, yang merepresentasikan arus jalan tanpa beban (*no-load running current*) dan mengindikasikan bahwa motor kompresor secara mekanis dan elektrik masih dalam keadaan normal. Sedangkan untuk arus fan kondensor stabil pada 0,25 A yang sesuai dengan datasheet fan M4Q045-CA03-51 yang sudah dijelaskan pada subbab 2.4.2.

**Gambar 4. 14** Grafik Pengukuran Arus Kompresor dan Fan Kondensor Tanpa Beban

Dari pengujian **Tabel 4.3** dibuatlah diagram perbandingan pengukuran arus kompresor dan fan kondensor, dan dari data pengujian *inrush current* pada kedua

komponen tersebut masih normal, sehingga dapat disimpulkan kompresor dan fan kondensor dapat digunakan untuk sistem refrigerasi.

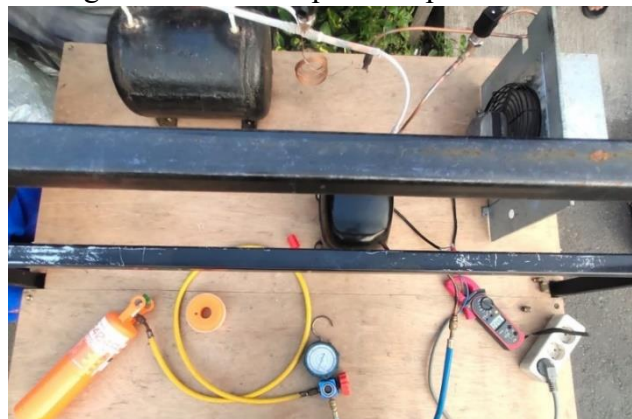
4.2.2 Proses Pengisian Refrigerant R404A

Proses pengisian refrigeran dimulai dengan menyiapkan refrigeran R-404A. Refrigeran R-404A yang digunakan merupakan refrigeran dari pabrikan Tanaka dengan berat bersih 650 gram dan memiliki kode warna jingga seperti pada **Gambar 4.15** berikut.



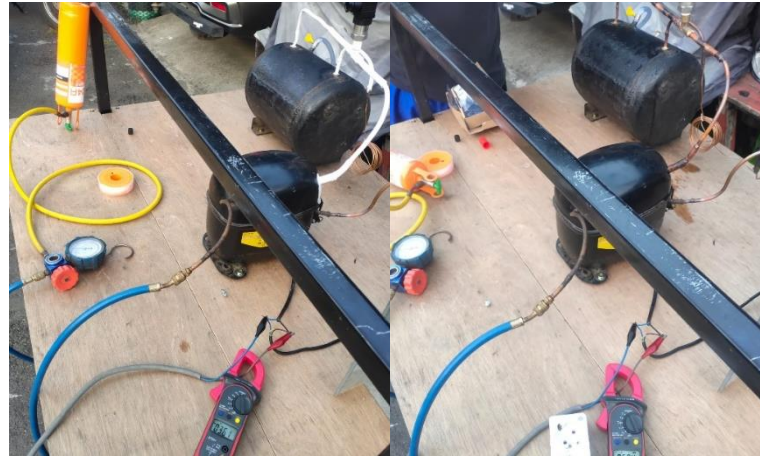
Gambar 4.15 Refrigerant R-404A Tanaka

Lalu untuk pengisian refrigeran digunakan *manifold gauge* dengan menghubungkan selang kuning manifold ke tabung refrigerant R-404A dan selang biru manifold dihubungkan *suction* kompresor seperti **Gambar 4.16**.



Gambar 4.16 Proses Pengisian Refrigeran

Sistem refrigerasi dinyalakan dengan menghubungkan kompresor dan kipas kondensor ke sumber 220 V AC, lalu katup pada tabung refrigeran dibuka baru katup pada manifold mulai dibuka perlahan dan bertahap sehingga refrigeran dalam fasa gas masuk ke sisi isap kompresor.



Gambar 4.17 Kondisi Pipa Evaporator

Bersamaan dengan pengisian refrigeran, dilakukan observasi kondisi evaporator. Kondisi awal saat pengisian akan terjadi embun es (*frost*) yang menandakan sistem kekurangan muatan refrigeran (*undercharged*). Pengisian dapat dihentikan ketika embun es (*frost*) yang awalnya terbentuk di sepanjang permukaan evaporator dan pipa isap mulai menghilang dari pipa isap, dan pipa tersebut hanya terasa dingin dan sedikit berembun (*sweating*). Kondisi ini mengindikasikan bahwa refrigeran telah selesai berevaporasi (berubah menjadi gas sepenuhnya) tepat di akhir koil evaporator. Ini adalah kondisi operasional yang ideal (*superheat*) untuk memastikan tidak ada refrigeran dalam fasa cair yang kembali dan berpotensi merusak katup kompresor. Lalu amati manifold gauge, apakah sudah sesuai atau kurang dari nilai tekanan evaporasi yang sudah dirancang pada subbab 3.5.1. Untuk nilai manifold gauge akhir tertera pada **Gambar 4.18**.



Gambar 4.18 Hasil Pengukuran Manifold Gauge

Dari **Gambar 4.18** hasil pengukuran *manifold gauge* menunjukkan 10 psi atau setara 0.69 bar yang mana nilai ini lebih rendah dari rancangan subbab 3.5.1 yaitu 33 psig atau 3,29 bar. Jika dilihat pada tabel P-T data refrigeran **Gambar 2.13** 0,6 bar atau 10 psi memiliki suhu -34°C . Alasan mengapa menghentikan pengisian refrigeran pada titik ini didasarkan pada observasi aktual pada tekanan 0,6 bar, pipa *suction* sudah sangat dingin dengan pressure yang tidak terlalu tinggi sehingga aman untuk sistem yang telah dirancang. Refrigeran R-404A juga lebih efisien jika digunakan pada suhu rendah sehingga diharapkan efisien lebih tinggi dibanding perancangan yang telah dilakukan.

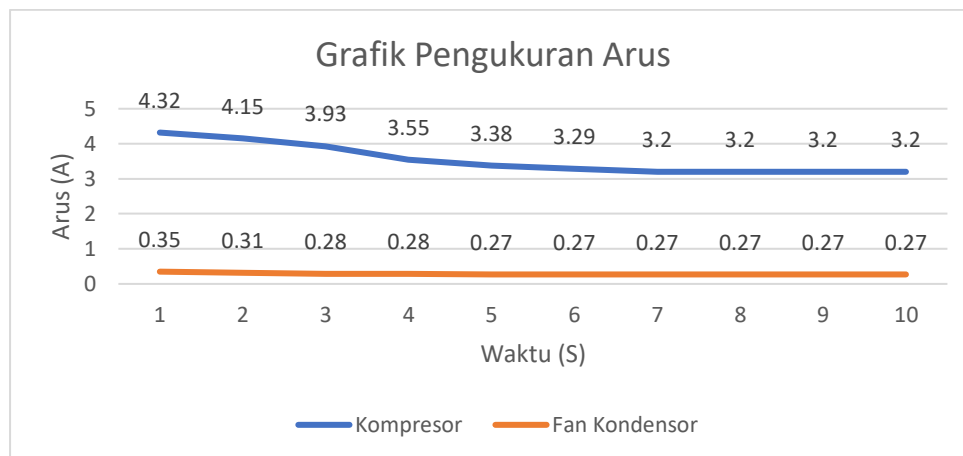
Setelah proses observasi, dilakukan pengukuran arus dengan beban refrigeran pada sistem refrigerasi yang sudah tidak mengalami *frosting*. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui perbandingan arus kerja kompresor dan *fan* kondensor tanpa beban dan dengan beban refrigeran. Sesuai pada **Gambar 4.18** pengukuran dilakukan menggunakan tang ampere dengan hasil pada **Tabel 4.4** berikut.

Tabel 4.4 Tabel Pengukuran Arus Kompresor dan *Fan* Kondensor Dengan Beban

Kompresor	Fan Kondensor
(A)	(A)
4.32	0.35
4.15	0.31
3.93	0.28
3.55	0.28
3.38	0.27
3.29	0.27
3.2	0.27
3.2	0.27
3.2	0.27
3.2	0.27

Berdasarkan **Tabel 4.4** pengujian kompresor dan *fan* kondensor setelah diisi beban refrigeran R-404A, lonjakan awal (*inrush current*) untuk torsi awal kompresor mencapai 4,32 A hingga stabil pada 3,2 A. Untuk *fan* kondensor arus

awal di 0,35 A lalu stabil di 0,27 A karena dipengaruhi oleh tekanan internal di dalam pipa yang melepas kalor lebih tinggi.



Gambar 4.19 Grafik Pengukuran Arus Kompresor dan *Fan* Kondensor Dengan Beban

Dari data pengujian pada **Tabel 4.4** dibuatlah grafik pengukuran untuk mengetahui perbandingan grafik antara pengukuran arus kompresor dengan arus fan kondensor pada **Gambar 4.19**. Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan, data yang didapatkan memvalidasi bahwa sistem tidak hanya berfungsi dengan baik, dan dari data pengukuran arus dapat divalidasi bahwa kompresor dan *fan* kondensor bekerja dengan normal dan stabil.

4.3 Pengujian Kontrol Sistem Refrigerasi

Setelah dilakukan tahapan validasi fungsional komponen dan kalibrasi sensor, pada subbab ini akan dilakukan analisis integrasi sistem secara menyeluruh untuk menguji respon keseluruhan sistem refrigerasi. Pengujian dimulai dengan menguji sistem on/off dengan nilai histerisis yang ditentukan dan disaat bersamaan dilakukan pengujian akurasi dan kestabilan sensor suhu RTD PT100 dan Wisner WPT 71G. Setelah pengujian, dilakukan evaluasi dengan mengamati korelasi antara perubahan data suhu aktual (*process variable*) terhadap respons logika PLC dalam melakukan pemutusan (*cut-out*) dan penyambungan (*cut-in*) arus ke aktuator untuk mempertahankan temperatur air pada rentang *setpoint* yang telah ditentukan.

4.3.1 Pengujian Respon Sistem Logika Histeresis Terhadap Suhu Aktual

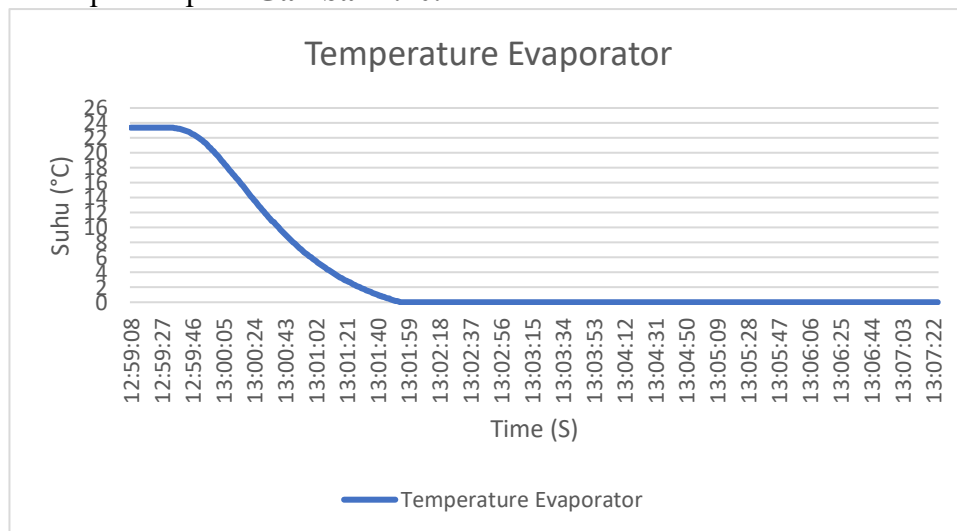
Dalam pengujian respon logika histeresis, variable difokuskan pada status bit *GVL.Kompresor* terhadap perubahan variabel suhu aktual *GVL.Temp1_Deg*. Suhu

aktual tersebut diambil dari suhu evaporator yang berfungsi menjaga suhu air sebagai media perantara (*heat transfer fluid*) atau refrigeran sekunder yang bersirkulasi menyerap kalor di evaporator sebelum didistribusikan ke AHU dengan beban pendinginan udara ruangan. Maka, dilakukan pengambilan data suhu aktual *GVL.Templ_Deg* untuk mengetahui berapa rentang waktu hingga sistem mencapai batas bawah suhu yang dapat dicapai oleh sistem disajikan dalam **Tabel 4.5** berikut.

Tabel 4.5 Tabel Suhu Aktual Terhadap Waktu

Waktu Interval 60 detik (S)	Rata-rata Suhu Evap (°C)
12:59:08	23,36
13:00:08	17,75
13:01:08	9.13
13:02:08	1.46
13:03:08	0
13:04:08	0
13:05:08	0

Dari tabel pengujian pada **Tabel 4.5**, sistem refrigerasi diuji dengan suhu awal sesuai suhu ruang dan data yang diambil merupakan data rata-rata dalam interval 1 menit. Untuk mengetahui data aktual pembacaan suhu sistem dibuat grafik dari data aktual tiap detik pada **Gambar 4.20**.



Gambar 4.20 Data Suhu Evaporator Aktual Interval 1s

Grafik pada **Gambar 4.20** menunjukkan suhu ruang konstan pada $23,36^{\circ}\text{C}$, lalu pada 12:59:08 sistem refrigerasi aktif dan suhu mulai turun hingga pada 13:01:54 pembacaan suhu mulai konstan pada 0°C karena pembacaan sensor tidak dapat lebih rendah dari 0°C . Maka dari itu, untuk mengetahui batas bawah pendinginan yang dapat dicapai oleh sistem digunakan multimeter Value VMC-1 pengukuran suhu terus turun hingga -17°C seperti pada **Gambar 4.21**.



Gambar 4.21 Pengukuran Suhu Aktual Evaporator Dengan Multimeter Value VMC-1

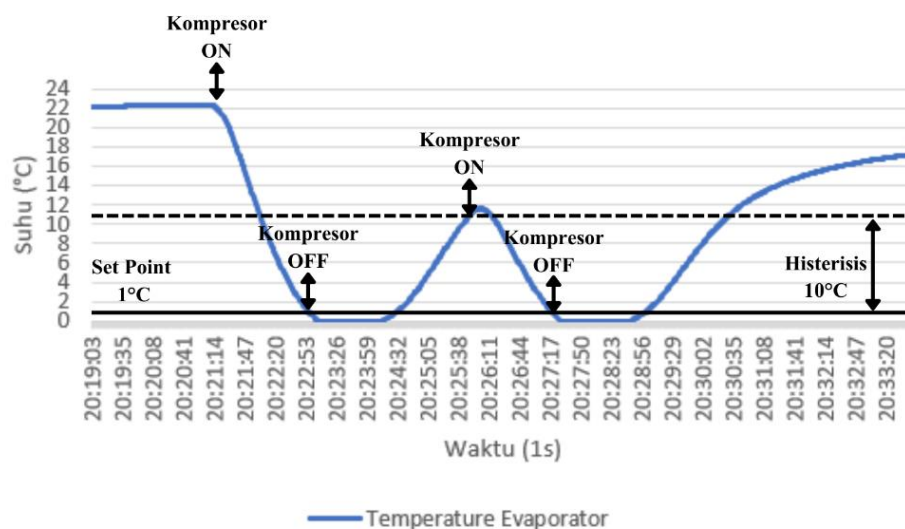
Pada **Gambar 4.21** menunjukkan ambang batas bawah suhu yang dapat dicapai sistem di -17°C . Dari data tersebut menunjukkan adanya deviasi jika dibandingkan dengan tekanan *suction* terukur menggunakan *manifold gauge* sebesar 10 psi atau di 0,6 bar yang dalam P-t *chart* memiliki suhu -34°C . Lalu untuk suhu kondensor saat suhu -17°C kondensor berada pada suhu $36,2^{\circ}\text{C}$. Pada suhu terendah deviasi sebesar 17°C ini bisa disebabkan oleh hambatan termal dinding pipa tembaga dan beban pendinginan. Hambatan termal dinding pipa terjadi karena pengukuran diletakkan pada permukaan pipa, tidak langsung ke dalam aliran refrigeran sehingga menyebabkan hambatan termal antara probe sensor dan dinding pipa. Beban pendinginan juga berpengaruh dimana laju pendinginan sistem dan laju penyerapan panas dari air didalam tube dan lingkungan menyebabkan rugi perpindahan panas sehingga suhu tidak dapat mencapai suhu yang di rancang.

Dari data pengujian tersebut, nilai *set value* ditentukan pada 0°C hingga 10°C sesuai kapasitas terendah sensor hanya dapat membaca di 0°C . Rentang batas

bawah 0°C dipilih juga berdasarkan titik beku (*freezing point*) air pada 0°C. Mengatur *set point* di bawah 0°C pada sistem *water chiller* tanpa campuran anti-beku sangat berbahaya karena akan menyebabkan air membeku di dalam *Evaporator*, yang berisiko memecahkan pipa es. Standar ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) juga merekomendasikan suhu air keluar *chiller* sekitar 6°C hingga 7°C atau 44°F.

Untuk histerisis dapat di *set* pada 10°C hingga 20°C untuk jeda waktu karena kompresor jenis piston (*Reciprocating*) membutuhkan start awal yang berat sehingga saat *pressure suction* dan *discharge* belum setimbang maka kompresor akan memompa tekanan sehingga tekanan pada pipa kan lebih tinggi dari awal. Maka nilai histerisis 10°C dirancang sehingga memberikan waktu bagi tekanan refrigeran untuk turun dan setimbang, meringankan kerja motor saat *start* berikutnya.

Sesuai parameter yang ditetapkan pada *Global Variabel List*, jika *GVL.Tl_Setpoint* 1°C (sebagai batas bawah) dan nilai *GVL.Histerisis* sebesar 10°C, maka sistem akan menjumlahkan nilai *setpoint* dan histerisis sehingga menghasilkan nilai *threshold* sebesar 11°C. Parameter tersebut bertujuan jika suhu aktual $\leq 1^\circ\text{C}$ kompresor non-aktif dan akan aktif apabila suhu aktual $\geq 11^\circ\text{C}$, lalu dibuatlah grafik respon sistem untuk mengetahui siklus kerja kompresor dan dibuat pada **Gambar 4.22**.



Gambar 4.22 Grafik Suhu Evaporator Set Value 1°C Histerisis 10°C

Berdasarkan grafik pada **Gambar 4.22** diketahui saat sistem tidak aktif suhu evaporator konstan pada 20:19:03 di 22,1°C lalu sistem *auto* aktif kompresor dan fan kondensor menyala sehingga suhu mulai turun, lalu pada 20:22:55 pembacaan sensor di 0,99°C sehingga kompresor off namun pembacaan sensor masih turun hingga 0°C beberapa saat. Suhu evaporator mulai naik karena penyerapan kalor dari beban dan lingkungan lalu kompresor aktif lagi pada 20:25:51 di suhu 11,03°C. Kompresor kembali bekerja dan pada fase pendinginan kedua ini suhu mencapai 0,98°C di 20:27:19 lalu kompresor off. Setelah fase pendinginan kedua sistem dimatikan hingga pada data terakhir 20:33:49 pada suhu 17,2°C. Pada fase pendinginan pertama kompresor hanya memerlukan waktu 3 menit 52 detik untuk mencapai *set value* 1°C dari suhu awal dan pada fase pendinginan kedua kompresor hanya memerlukan waktu 1 menit 28 detik untuk mencapai *set value* 1°C. Jadi dari pengujian tersebut dapat disimpulkan logika kontrol pada PLC TM241CE24T berhasil.

4.3.2 Analisis Parameter Termodinamika

Pengujian ini bertujuan memvalidasi respon sistem refrigerasi dengan mengamati parameter suhu dan tekanan dalam sistem. Analisis dibagi menjadi dua bagian, yaitu sisi tekanan rendah (*Low Side*) yang merepresentasikan kapasitas pendinginan yang terjadi di evaporator dan sisi tekanan tinggi (*High Side*) yang merepresentasikan proses antara kompresi dan pembuangan kalor.

4.3.2.1 Pengujian Tekanan Sistem Refrigerasi Saat Sistem Mati

Pada subbab ini dianalisis tekanan suction (*GVL.Press2_Bar*), discharge (*GVL.Press1_Bar*), *In filter* (*GVL.Press3_Bar*), dan *out kapiler* (*GVL.Press4_Bar*) dalam keadaan sistem saat kompresor dan fan kondensor dalam keadaan tidak aktif. Pengambilan data dilakukan untuk mengamati tekanan jenuh refrigeran R-404A di dalam sistem tertutup pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6 Pengujian Tekanan Saat Sistem Mati

Waktu (menit)	Tekanan Suction (Bar)	Tekanan Discharge (Bar)	In filter (Bar)	Out Kapiler (Bar)
1	10,476	10,500	10,495	10,479

Waktu (menit)	Tekanan Suction (Bar)	Tekanan Discharge (Bar)	In filter (Bar)	Out Kapiler (Bar)
2	10,456	10,482	10,481	10,465
3	10,446	10,470	10,467	10,450
4	10,446	10,476	10,473	10,452
5	10,517	10,484	10,479	10,522
Rata-rata	10,468	10,4824	10,479	10,473

Dari **Tabel 4.6** pengujian tekanan sistem didapati bahwa dalam keadaan sistem refrigerasi tidak aktif menunjukkan kesetimbangan (*equalized*) karena pada pipa kapiler memungkinkan refrigeran mengalir perlahan dari bagian discharge ke suction sehingga tekanan dalam pipa menjadi setimbang dimana tiap pressure menunjukkan rata-rata 10,4 dengan selisih 0,02 bar saja. Kesetimbangan ini menunjukkan bahwa tidak ada penyumbatan di dalam titik kritis yang berada antara filter dan pipa kapiler.

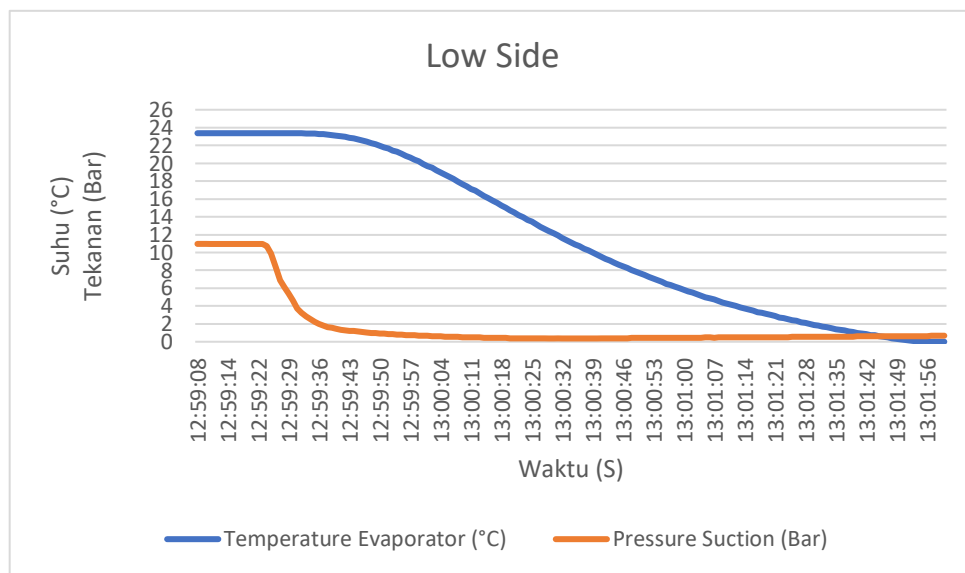
4.3.2.2 Suhu Evaporator dan Tekanan Suction (*Low Side*)

Pada subbab ini dilakukan analisa tentang hubungan antara penurunan suhu evaporator (*GVL.Temp1_Deg*) dan penurunan tekanan hisap (*GVL.Press1_Bar*) saat sistem aktif. Pada kondisi refrigeran jenuh (*Saturated*), penurunan uap refrigeran akan berbanding lurus dengan penurunan titik didihnya di dalam evaporator. Kondisi tersebut dibuktikan dengan **Tabel 4.7** yang dirata-rata menjadi 5 data.

Tabel 4.7 Data Pengujian Perubahan Tekanan Suction dan Suhu Evaporator

Waktu (S)	Pressure Suction (Bar)	Suhu Evaporator (°C)
35	7.225955	23.32112
35	0.73857	19.56994
35	0.383046	11.04274
35	0.471097	4.542822
35	0.595709	0.87633

Dari tabel pengujian pada **Tabel 4.7**, sistem refrigerasi diuji dengan suhu awal sesuai suhu ruang dan data yang diambil merupakan data rata-rata dalam interval 35s dimana saat sistem belum aktif pada 12:59:08 dengan suhu 23,37°C dan tekanan *suction* 10,96 bar. Pada 35 detik saat sistem sudah aktif terjadi penurunan yang signifikan pada tekanan *suction* dari 10,96 bar menjadi 1,35 bar lalu mencapai 0,36 bar sebelum kembali perlahan naik. Untuk suhu evaporator 35 detik pertama linier hanya turun menjadi 19°C dan 35 detik selanjutnya turun signifikan hingga 11°C dan mencapai setpoint pada 13:01:54 di 0°C. Dari data tersebut membuktikan bahwa semakin rendah *pressure suction* maka semakin rendah suhu evaporator dan sebaliknya. Untuk mengetahui data aktual pembacaan suhu sistem dibuat grafik dari data aktual tiap detik pada **Gambar 4.23** dengan mebandingkan nilai *pressure suction* dan suhu evaporator.



Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Suhu Evaporator Terhadap Pressure Suction

Pada **Gambar 4.23** saat sistem berjalan tekanan hisap dari kompresor tinggi hingga tekanan drop pada 0,36 bar lalu cukup stabil di 0,6 bar dan mengalami kenaikan, diikuti penurunan suhu evaporator yang cukup signifikan. Lalu tekanan *suction* mulai perlahan naik yang menandakan efisiensi kerja kompresor mulai turun akibat panas yang disebabkan oleh piston di dalam kompresor. Panas pada kompresor juga disebabkan akibat kondensor kurang maksimal membuang panas sehingga tekanan discharge meningkat dan membebani kerja kompresor.

4.3.2.3 Suhu Kondensor dan Tekanan Discharge (*High Side*)

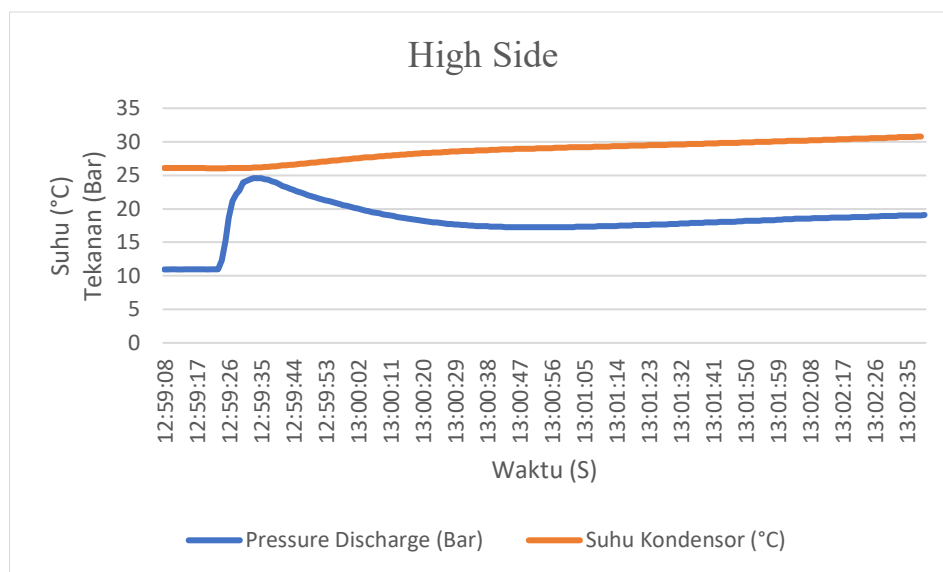
Pada subbab ini dilakukan analisa tentang tekanan buang kompresor (*GVL.Press2_Bar*) dengan suhu kondensor (*GVL.Temp2_Deg*) saat sistem aktif. Tekanan buang dari kompresor yang tinggi menyebabkan kenaikan suhu refrigeran melebihi suhu lingkungan sehingga menyebabkan proses pembuangan panas (*Heat Rejection*) di kondensor. Kondisi tersebut dibuktikan dengan **Tabel 4.8** berikut.

Tabel 4.8 Data Pengujian Perubahan Tekanan *Discharge* dan Suhu Kondensor

Waktu (S)	Pressure	Suhu
	Suction (Bar)	Evaporator (°C)
35	17.17608653	26.12593907
35	20.28440748	27.45927228
35	17.51350212	28.70329802
35	17.45740591	29.32635749
35	18.14730655	29.88732022

Data pada pengujian **Tabel 4.8** ini diambil bersamaan dengan pengujian **Tabel 4.7** dengan suhu ruang dan data yang diambil merupakan data rata-rata dalam interval 30s dimana saat sistem belum aktif pada 12:59:43 di 26°C dan tekanan di 10,9 bar. Pada 35 detik pertama terjadi kenaikan tekanan yang cukup tinggi dari 10,9 bar menjadi 24.5 bar disebabkan oleh tingginya kompresi refrigeran kompresor dan karakteristik pipa kapiler yang menciptakan hambatan aliran sementara, sehingga terjadi penumpukan refrigeran bertekanan tinggi di kondensor. Seiring berjalannya waktu, tekanan akan berangsur turun dan menjadi stabil ketika sirkulasi aliran refrigeran telah lancar dan beban pendinginan berkurang sejalan dengan penurunan temperatur air di dalam tangki sehingga tekanan turun perlahan hingga stabil di 17,4 bar dan semakin naik ketika sistem masih aktif. Kenaikan tekanan tersebut diikuti oleh kenaikan suhu kondensor dimana suhu awal di 26°C hingga mencapai 30°C dan semakin naik ketika sistem masih aktif. Untuk

mengetahui data aktual pembacaan suhu sistem dibuat grafik dari data aktual tiap detik pada **Gambar 4.24**.



Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Suhu Kondensor Terhadap Pressure Discharge

Pada **Gambar 4.24** kompresi tekanan dari kompresor yang tinggi mengakibatkan tekanan naik signifikan hingga mencapai 24,5 bar akibat hambatan pada pipa kapiler yang didorong tekanan refrigeran yang dikompresi kompresor dan diikuti kenaikan suhu kondensor hingga 30°C. Dapat dilihat dimana pressure awal konstan di 17,4 bar lalu perlahan naik ke 19 bar yang menandakan kompresor bekerja lebih keras sehingga daya input kompresor naik dan menyebabkan berkurangnya laju aliran massa refrigeran dan kapasitas pendinginan. Ketidakseimbangan ini, di mana input daya meningkat saat output pendinginan menurun, menjelaskan mengapa efisiensi termodinamika sistem tidak dapat dipertahankan pada kondisi optimal.

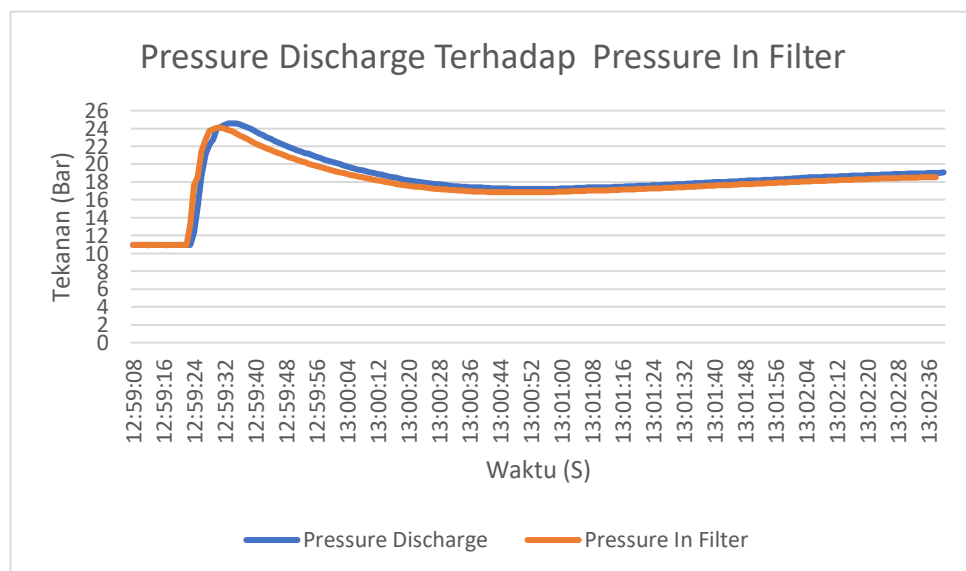
4.3.2.4 Analisis Tekanan Pada Titik Krisis Filter Dryer dan Pipa Kapiler

Dalam siklus refrigerasi kompresi uap, proses ekspansi merupakan titik kritis terjadinya perubahan tekanan yang signifikan dari tekanan tinggi (*high side*) menuju tekanan rendah (*low side*). Sensor Wisner WPT-71G ditempatkan pada masukan *filter dryer* untuk monitor tekanan kondensasi. Sensor Wisner WPT-71G juga ditempatkan setelah pipa kapiler (masukan evaporator). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik tekanan pada titik kritis sistem. Data hasil pengujian pada titik kritis dibuat dalam **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10**.

Tabel 4.9 Pressure Discharge Terhadap *Pressure In Filter*

Waktu (S)	Pressure Suction (Bar)	Pressure In Filter (Bar)
35	17.17608653	17.31812
35	20.28440748	19.42667
35	17.51350212	17.06498
35	17.45740591	17.07029
35	18.14730655	17.7041

Berdasarkan data pengujian pada **Tabel 4.9**, tekanan discharge kompresor dengan tekanan pada *in filter* linear dalam rentang waktu pengukuran antara kedua titik ukur, di mana kenaikan tekanan discharge selalu diikuti oleh kenaikan tekanan pada filter. Pada interval waktu 12:59:43 hingga 13:01:16, saat tekanan discharge mencapai puncaknya di 20.28 Bar, tekanan yang terbaca pada inlet filter adalah sebesar 19.42 bar, terdapat selisih nilai sekitar 0.86 Bar di antara kedua titik tersebut.. Penurunan ini disebabkan oleh hambatan gesek antara fluida refrigeran R-404A dengan dinding pipa kondensor yang panjang. Dari data pengujian tersebut dibuatlah grafik perbandingan pada **Gambar 4.25** untuk mengetahui selisih dari kedua tekanan tersebut.

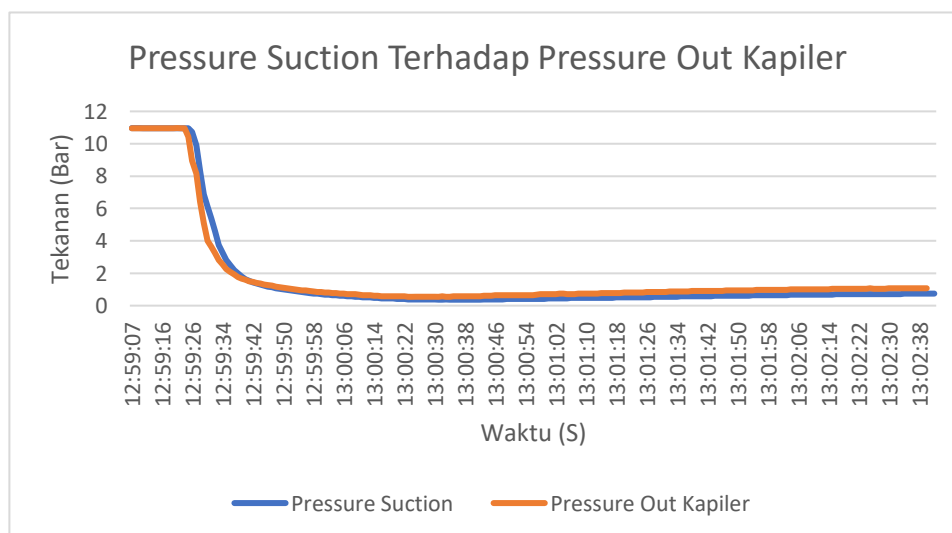
**Gambar 4.25** Grafik Perbandingan *Pressure Discharge* dan *Pressure In Filter*

Pada **Gambar 4.25** menunjukkan bahwa kedua *pressure* bergerak linier dan hanya terdapat selisih kecil akibat gesekan antara refrigeran R-404A dengan dinding pipa kondensor. Pada titik kritis ini juga dilakukan pengujian antara *pressure suction* terhadap *pressure out* kapiler yang disajikan pada **Tabel 4.10** berikut.

Tabel 4.10 Pressure Suction Terhadap Pressure Out Kapiler

Waktu (S)	Pressure Suction (Bar)	Pressure Out Kapiler (Bar)
35	7.225955	6.766614
35	0.73857	0.837743
35	0.383046	0.590659
35	0.471097	0.75719
35	0.595709	0.920746

Pada **Tabel 4.10** menampilkan tekanan pada sisi tekanan rendah, dengan membandingkan tekanan keluaran pipa kapiler (Pressure Out Kapiler) terhadap tekanan hisap kompresor (Pressure Suction). Data menunjukkan bahwa tekanan pada titik keluar kapiler secara konsisten memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan tekanan suction. Contoh pada data baris terakhir pada interval 13:02:06 hingga 13:02:40, di mana Pressure Out Kapiler tercatat sebesar 0.92 Bar, sedangkan Pressure Suction berada di angka 0.59 Bar.



Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Pressure Suction dan Pressure Out Kapiler

Pada **Gambar 4.26** menunjukkan bahwa kedua *pressure* bergerak linier dan hanya terdapat selisih kecil akibat gesekan antara fluida refrigeran R-404A dengan dinding pipa evaporator yang panjang. Data yang diperoleh dari **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10** ini dapat digunakan sebagai variabel kontrol dan juga indikator sistem apabila terjadi lonjakan tekanan akibat penyumbatan pada masukan pipa kapiler.

4.4 Analisa Pengujian

Hasil pengukuran catu daya menggunakan *power supply* 24V DC dengan beban resistif mulai dari 470 Ω hingga 100 Ω didapati pengukuran catu daya di 233V AC dan *power supply* di 24V DC, lalu hasil perbandingan arus keluaran (*Iout*) dan menunjukkan error dari hasil pengukuran dan teori dengan rata-rata error 1,132%. Dari hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa *power supply* 24 V DC stabil untuk digunakan sebagai sumber dari komponen.

Pada pengujian PLC TM241CE24T dan modul analog TM3AI8, kedua komponen dapat terkoneksi dan dapat di konfigurasi menggunakan *EcoStruxure Machine Expert*. Konfigurasi dilakukan untuk pin I/O serta pin analog yang disesuaikan dengan spesifikasi sensor PT100 dan sensor Wisner WPT-71G.

Pengujian Relay LY2N dilakukan dengan memberi kontrol pada coil relay lalu diuji kontak pada relay apakah dapat digunakan. Saat pengujian jika coil aktif maka kontak dengan kondisi awal NO menjadi NC dan sebaliknya, lalu relay dapat mengalirkan tegangan 220 V AC dengan aman.

Pada pengujian Wisner WPT-71G yang merupakan perangkat *fixed-range* maka kalibrasi yang dilakukan untuk memvalidasi akurasi digunakan nilai *zero offset* pembacaan sensor. 0,04884005 bar dan 0,06105006. Nilai inilah yang menjadi *absolute error* atau *zero offset* dari pengukuran sensor. Dimana memiliki *error* yang sangat kecil, yaitu hanya 0.244% dari skala penuh sehingga sensor memiliki akurasi tinggi serta dapat digunakan untuk pengambilan data.

Untuk sensor suhu PT100 dilakukan kalibrasi pembacaan arus yang sudah diolah modul analog TM3AI8 dengan melakukan perbandingan hasil pengukuran suhu dengan alat ukur digital thermometer TM-902C dengan hasil menunjukkan nilai terukur pada PLC sebesar 27,17949°C dengan tingkat kesalahan (*error*) hanya

0,293%, yang memvalidasi akurasi sensor sehingga dapat digunakan dalam pengujian sistem refrigerasi.

Lalu untuk kontrol sistem refrigerasi digunakan *setpoint*, histerisis, dan *threshold*, dimana jika *setpoint* 8°C (sebagai batas bawah) dan nilai histerisis sebesar 10°C, maka sistem akan menjumlahkan nilai *setpoint* dan histerisis sehingga menghasilkan nilai *threshold* sebesar 18°C. Parameter tersebut bertujuan jika suhu aktual $\leq 8^\circ\text{C}$ kompresor non-aktif dan akan aktif apabila suhu aktual $\geq 18^\circ\text{C}$.

Setelah pengujian yang dilakukan maka penulis melakukan analisa keseluruhan sistem refrigerasi yang telah dirancang dengan hasil sistem aktual. Maka dibuatlah tabel perbandingan hasil perancangan awal dengan hasil data aktual yang didapati dalam pengujian pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4.11 Perbandingan Perancangan Sistem Refrigerasi Dengan Parameter Aktual

Parameter	Satuan	Perancangan	Aktual	Deviasi
Suhu Evaporator	°C	-17	-17	0
Suhu Kondensor	°C	36	36,2	0,2
Pressure Suction	Bar	16,6	17,45	0,85
Pressure Discharge	Bar	3,29	0,59	2,7

Berdasarkan **Tabel 4.11** data pengujian pada kondisi beban batas bawah, sistem mampu mencapai suhu terendah di -17°C berdasarkan pembacaan sensor suhu *evaporator*. Pada titik ini, terdapat deviasi termodinamika yang signifikan di mana tekanan *suction* terukur stabil pada 0,59 Bar (setara dengan pengisian 10 PSI atau 0,6 Bar), yang menurut referensi *P-T Chart* R-404A seharusnya memiliki suhu di -34°C . Selisih sebesar 17°C antara suhu aktual (-17°C) dan suhu jenuh (-34°C) ini, memastikan bahwa refrigeran yang masuk ke kompresor sepenuhnya berfase gas. Di sisi lain, pada tekanan kondensor 17,45 Bar yang memiliki suhu sekitar $40,5^\circ\text{C}$, temperatur aktual kondensor justru terukur lebih rendah, yaitu $36,2^\circ\text{C}$. Selisih sebesar $4,3^\circ\text{C}$ ini menunjukkan terjadinya *subcooling*, yang membuktikan efektivitas penukaran kalor pada kondensor dalam menurunkan temperatur cairan refrigeran di bawah titik jenuhnya sebelum memasuki pipa kapiler, sehingga meningkatkan efisiensi siklus pendinginan secara keseluruhan.