

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **IV.1 Pembuatan Perangkat Monitoring Kelembaban**

##### IV.1.1 *Analyze* (Analisis)

Berikut daftar kebutuhan software dan hardware yang dibutuhkan untuk merakit dan merancang rancang bangun alat monitoring kelembaban pada tangki udara dengan menggunakan mikrokontroler raspberry pi.

##### *a. Perangkat Lunak (Software)*

Perangkat lunak yang digunakan mencakup Autodesk 360 sebagai alat bantu dalam desain mekanik, Thonny untuk pemrograman mikrokontroler, serta Fritzing versi 1.0.1 tahun 2024 untuk pembuatan diagram rangkaian elektronik.

##### *b. Perangkat Keras (Hardware)*

Aspek perangkat keras (*hardware*) mencakup komponen penting yang berperan sebagai komponen project box yaitu kabel jumper, buzzer, 1 buah mikrokontroler Raspberry Pi Pico, LCD I2C, 1 dan buah saklar cut off. Komponen yang digunakan untuk membuat replika tabung udara yaitu 1 buah tabung air shimizu, 1 buah drat, Sensor AHT 20 serta komponen lainnya seperti las, solder, dan timah.

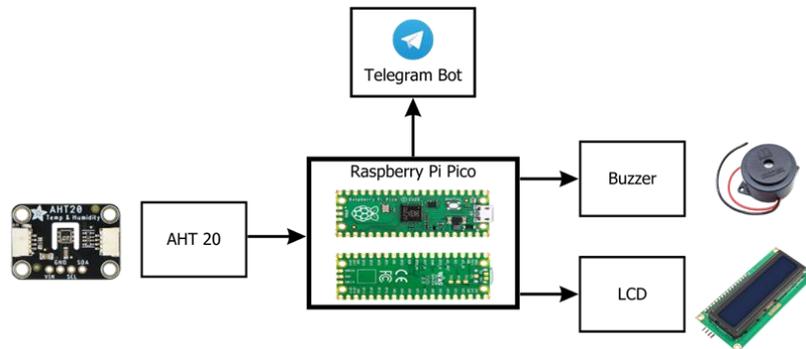
##### IV.1.2 Perancangan (*Design*)

Desain alat dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu rancangan bentuk fisik, desain jalur kabel (*wiring*), dan pembuatan diagram blok.

##### 1. Perancangan Diagram Blok

Diagram blok dirancang untuk menunjukkan alur kerja alat yang melibatkan sensor AHT 20 sebagai pendeteksi utama kelembaban pada tangki udara. Data kelembaban dikirim menuju mikrokontroler Raspberry Pi Pico selanjutnya diterima dan ditampilkan melalui layar LCD I2C. Kelembaban yang melampaui ambang batas 70% memicu bunyi buzzer disertai pengiriman pesan otomatis melalui bot ke aplikasi Telegram sebagai peringatan bagi pengemudi agar

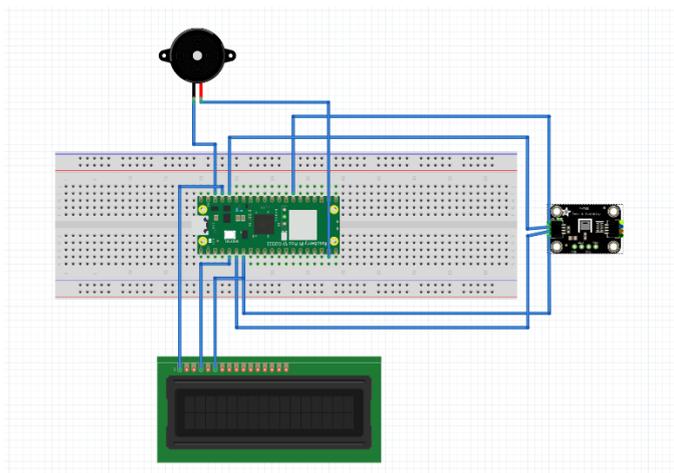
segera menguras tangki. Perancangan diagram blok dapat dilihat pada **Gambar IV.1**.



**Gambar IV.1** Perancangan Diagram Blok

## 2. Perancangan *Wiring*

Perancangan *wiring* pada alat dilakukan menggunakan aplikasi fritzing dengan menghubungkan antar pin pada komponen mikrokontroler Rassa berry Pi Pico, LCD I2C, Buzzer, dan Sensor AHT 20. Perancangan *wiring* dapat dilihat pada **Gambar IV.2**.



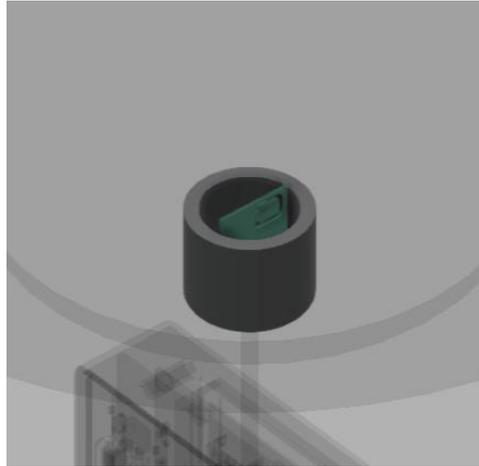
**Gambar IV.2** Perancangan Wiring

## 3. Perancangan Bentuk Alat

Perancangan bentuk alat dibuat menggunakan aplikasi Autodesk 360 untuk memvisualisasikan desain secara tiga dimensi secara detail dan presisi.

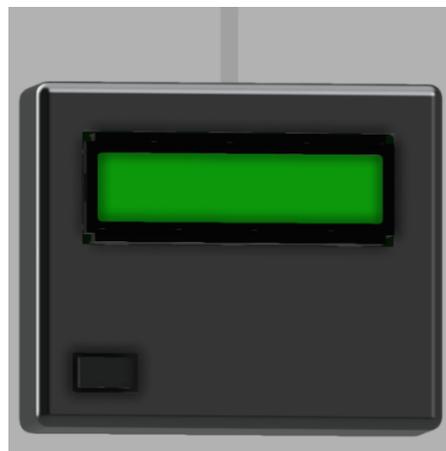
Perancangan sensor diletakkan di dalam tutup pentil ban menggunakan komponen sensor AHT 20 dan drat. Sensor AHT20 dipasang secara presisi untuk mendeteksi kelembaban udara, dan drat

ditempatkan di bagian bawah tabung sebagai simulasi fungsi *check valve*. Letak sensor di dalam tutup pentil memudahkan pembacaan data secara akurat. Desain sensor ini ditunjukkan pada **Gambar IV.3**.



**Gambar IV.3** Perancangan Bentuk Sensor

Perancangan output alat menggunakan komponen Raspberry Pi Pico, LCD I2C, dan buzzer. Seluruh komponen diletakkan pada project box yang ditempatkan di atas *dashboard* agar mudah terlihat pengemudi dan dapat memantau secara *realtime* kelembaban udara di dalam tangki. Desain output alat ditampilkan pada **Gambar IV.4**.



**Gambar IV.4** Perancangan Bentuk Output Alat.

### IV.1.3 Pengembangan (*Develop*)

#### 1. Perakitan Alat

Perakitan alat mengikuti desain, skema wiring, dan diagram blok yang sudah ditentukan sebelumnya. Tahapan dimulai dengan merangkai komponen hingga alat berfungsi sesuai rancangan. Proses perakitan terbagi dalam dua bagian utama meliputi perakitan bagian sensor dan perakitan bagian output.

##### a. Perakitan Sensor

Perakitan sensor melibatkan komponen utama berupa 1 buah sensor AHT20, drat, dan kabel penghubung. Proses perakitan dimulai dari penyambungan kabel sensor ke project box hingga pemasangan sensor ke dalam tutup pentil. Hasil perakitan sensor alat ditunjukkan seperti pada **Gambar IV.5**.



**Gambar IV.5** Perakitan Sensor AHT 20

##### b. Perakitan Output

Perakitan output menggunakan komponen utama berupa mikrokontroler Raspberry Pi Pico, buzzer, LCD I2C dan push button. Tahapan perakitan diawali dengan menghubungkan pin mikrokontroler Raspberry Pi Pico ke LCD I2C dan buzzer, dilanjutkan penyambungan push button serta modul charger ke supply. Semua komponen dirangkai dalam project box agar tertata rapi dan mudah diakses. Hasil perakitan output alat ditunjukkan pada **Gambar IV.6**.



**Gambar IV.6** Perakitan Output Alat

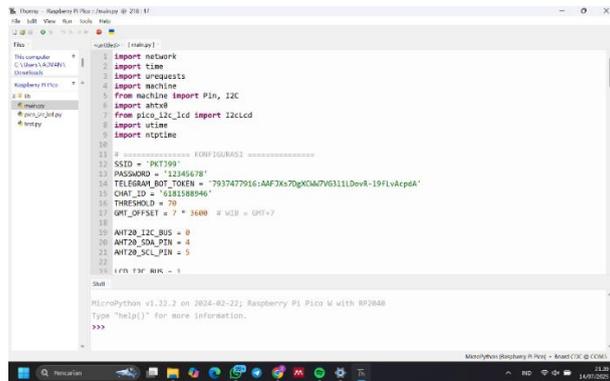
Semua komponen terakit dan dimasukkan ke dalam project box agar lebih rapi dan terlindungi. Susunan komponen diatur agar mudah diakses seperti **Gambar IV.7**.



**Gambar IV.7** Perakitan Box Output Alat

## 2. Pemrograman Alat

Penyusunan program menggunakan aplikasi Thonny agar alat berfungsi sesuai rancangan. Semua perintah untuk pembacaan sensor dan pengendalian output dikemas dalam satu program. Tampilan program terdapat pada **Gambar IV.8**.



**Gambar IV.8** Pemrograman Alat

#### IV.1.4 Pelaksanaan (*Implement*)

##### 1. Instalasi Alat

Alat berfungsi sebagai prototipe dan dipasang di dua bagian. Sensor ditempatkan di bagian bawah tabung agar pembacaan kelembaban lebih akurat. Project box berisi komponen output diletakkan di atas dashboard sebagai contoh penempatan agar pembacaan data mudah dilihat. Gambaran pemasangan terdapat pada **Gambar IV.9**.



**Gambar IV.9** Peletakan Output Alat

Sensor diposisikan di bagian bawah drat sebagai simulasi penempatan pada check valve. Pemasangan dilakukan dengan memutar sensor searah jarum jam hingga terpasang rapat. Ilustrasi pemasangan sensor alat terdapat pada **Gambar IV.10**.



**Gambar IV.10** Peletakan Sensor Alat

## 2. Uji coba

Uji coba dilaksanakan begitu sensor dan output terpasang. Pemeriksaan terdiri atas validasi pembacaan kelembaban oleh sensor, pemrosesan data oleh mikrokontroler, serta penampilan informasi oleh output sesuai suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan kelembaban (%) yang terdeteksi.

Uji coba berlangsung pada prototipe tabung rem angin sebagai simulasi tangki udara. Sensor di bagian bawah tabung diaktifkan agar membaca kelembaban di dalam tangki. Output alat dinyalakan agar menampilkan data pembacaan secara real-time.

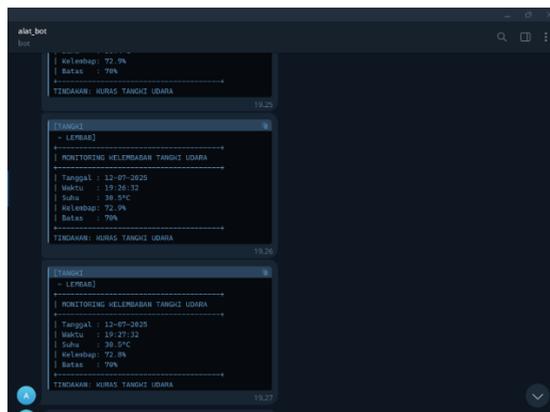
**Tabel IV.1** Uji Coba Alat

NO	KOMPONEN	KETERANGAN	
		Normal (√)	Tidak Normal (X)
1.	Sensor AHT 20 mendeteksi kelembaban pada tangki	√	
2.	LCD I2C menampilkan data kelembaban	√	
3.	Buzzer peringatan peringatan jika kelembaban melebihi ambang batas	√	
4.	Chatbot Telegram mengirim notifikasi kepada pengguna terkait kondisi kelembaban tangki	√	

Uji coba menunjukkan alat berfungsi normal. Sensor dan mikrokontroler mendeteksi kelembaban udara dalam tangki, mengolah data, menampilkan hasil pada LCD I2C, mengaktifkan buzzer saat melebihi ambang batas, dan mengirim notifikasi ke ChatbotTelegram **Gambar IV.11**.



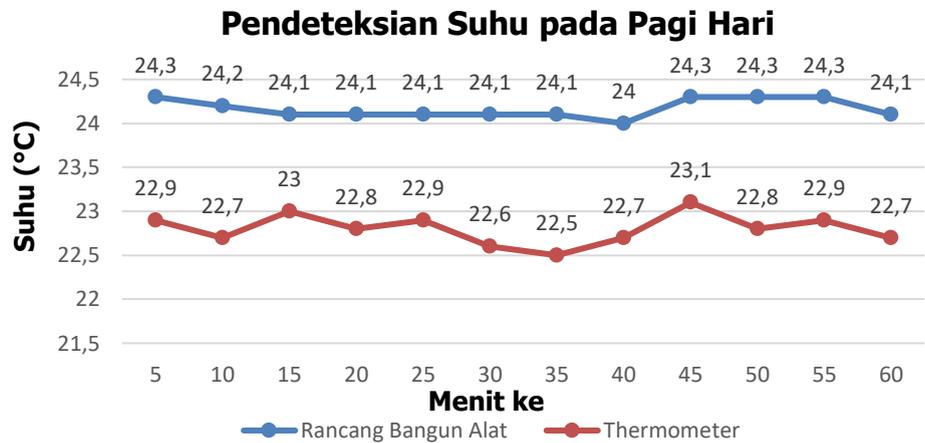
**Gambar IV.11** Uji Coba Alat



**Gambar IV.12** Pesan Chatbot Telegram

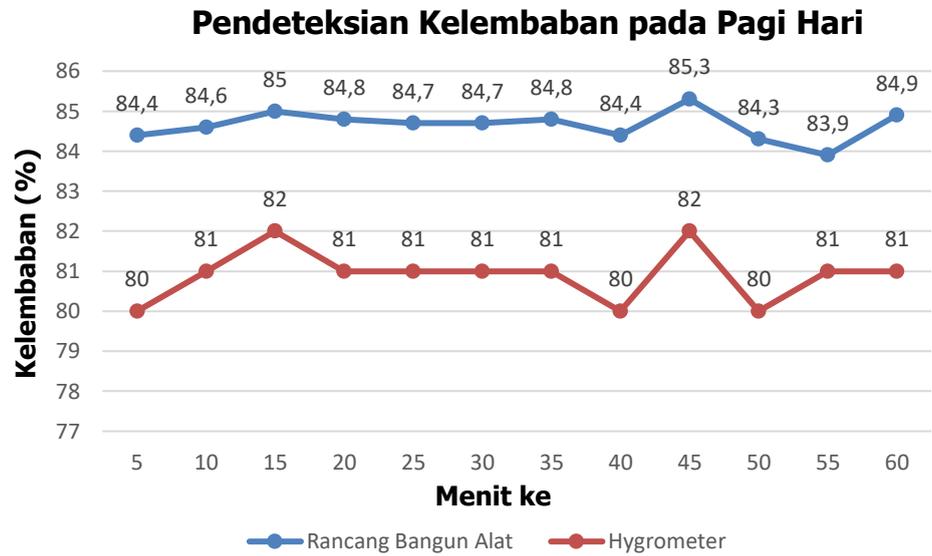
3. Perbandingan Pendeteksian Suhu dan Kelembaban antara Alat yang dibuat dengan Thermo Hygrometer Digital
  - a. Pagi Hari

Pengamatan dilakukan selama 60 menit dimulai pada pukul 04.00. Hasil menampilkan perbandingan nilai suhu rancangan alat terhadap thermometer selama 60 menit pengamatan. Suhu alat menunjukkan stabilitas tinggi pada rentang 24,1 °C hingga 24,3 °C. Suhu hygrometer berkisar antara 22,5 °C hingga 23,1 °C. Selisih terbesar muncul pada menit ke-30 sebesar 7,1 °C. Nilai akurasi tertinggi tercatat pada menit ke-15 sebesar 95,2 %. Akurasi terendah muncul pada menit ke-10 dan ke-30 sebesar 93,4 %. Grafik menunjukkan kecenderungan konstan tanpa lonjakan ekstrem dan mencerminkan kestabilan operasional perangkat dalam kondisi pagi hari.



**Gambar IV.13** Perbandingan Pendeteksian Suhu pada Pagi Hari

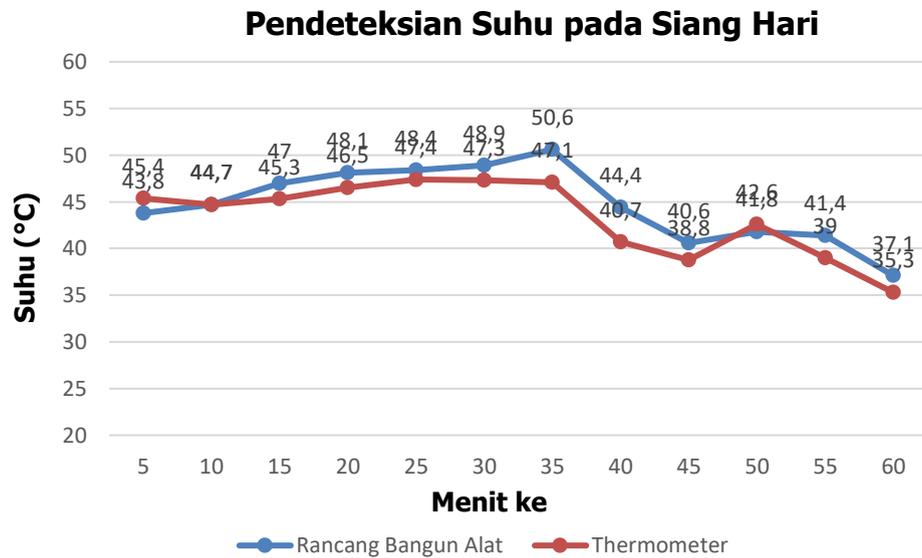
Pengamatan dimulai pukul 04.00 selama 60 menit dan dilakukan bersamaan dengan pemantauan suhu. Grafik menampilkan perbandingan tingkat kelembaban antara alat rancangan dan hygrometer selama 60 menit pengamatan. Nilai kelembaban alat bergerak stabil antara 84,3 % hingga 85 %. Pembacaan hygrometer berkisar antara 80% hingga 82 %. Selisih terkecil terjadi pada menit ke-55 sebesar 3,6 %, sementara selisih terbesar muncul pada menit ke-5 dan ke-40 sebesar 5,5 %. Nilai akurasi tertinggi tercatat pada menit ke-55 sebesar 96,4 %, dan akurasi rata-rata berada di atas 95 %. Grafik mencerminkan kinerja sensor yang konsisten pada kondisi kelembaban pagi hari.



**Gambar IV.14** Perbandingan Pendeteksian Kelembaban pada Pagi Hari

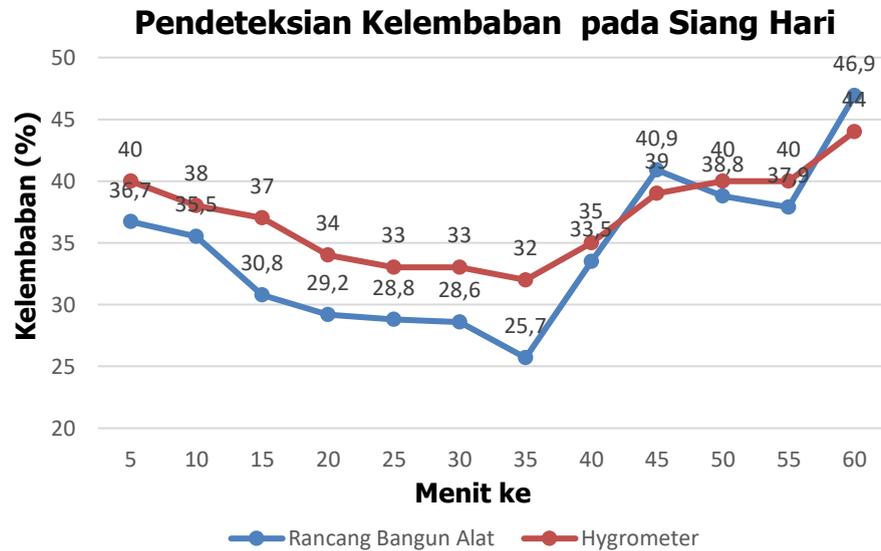
b. Siang Hari

Pengamatan dilakukan selama 60 menit dimulai pada pukul 12.00. Grafik memperlihatkan tren pembacaan suhu oleh alat rancangan dan thermometer selama periode 60 menit. Nilai suhu alat mengalami kenaikan di menit ke-30 dengan puncak 50,6°C. Menurun drastis hingga 37,1°C pada menit ke-60. Pembacaan hygrometer bergerak antara 35,3°C hingga 47,4°C menunjukkan penurunan tajam mulai menit ke-35. Selisih tertinggi muncul pada menit ke-55 sebesar 42,8°C. Akurasi tertinggi tercatat pada menit ke-10 sebesar 100%. Akurasi terendah terjadi pada menit ke-55 sebesar 57,2%. Pola grafik menandai ketidakteraturan suhu akibat perubahan kondisi lingkungan siang hari yang ekstrem.



**Gambar IV.15** Perbandingan Pendeteksian Suhu pada Siang Hari

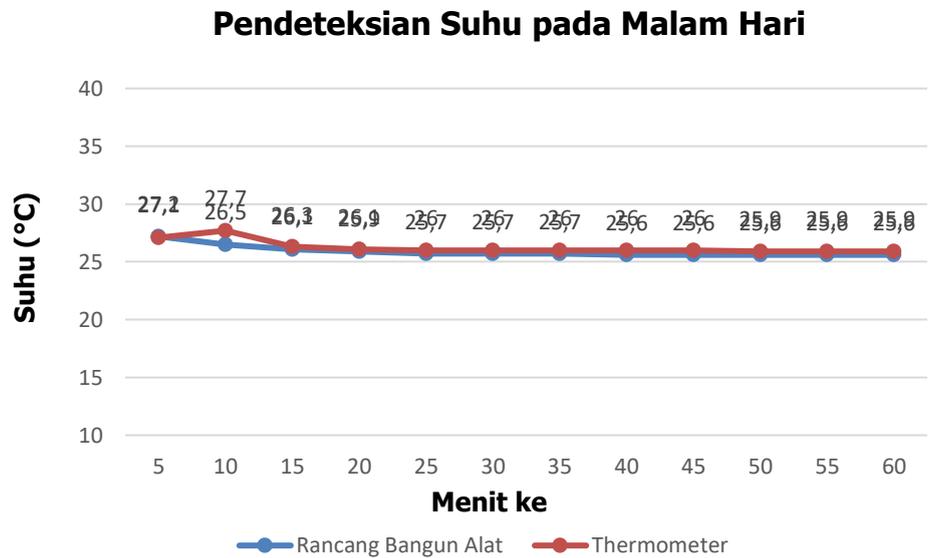
Pengamatan dimulai pukul 04.00 selama 60 menit dan dilakukan bersamaan dengan pemantauan suhu. Grafik menunjukkan perbandingan kelembaban antara alat rancangan dan hygrometer selama pengamatan siang hari. Nilai kelembaban alat rancangan berada di bawah hygrometer pada setiap titik waktu, dengan selisih tertinggi sebesar 19,7 % pada menit ke-35 dan terendah 3,9 % pada menit ke-50. Pola data alat rancangan cenderung lebih stabil, sedangkan hygrometer mengalami fluktuasi lebih besar. Perbedaan tersebut mencerminkan akurasi alat rancangan yang bervariasi dengan tingkat akurasi tertinggi mencapai 95,1 % dan terendah 80,3%.



**Gambar IV.16** Perbandingan Pendeteksian Kelembaban pada Siang Hari

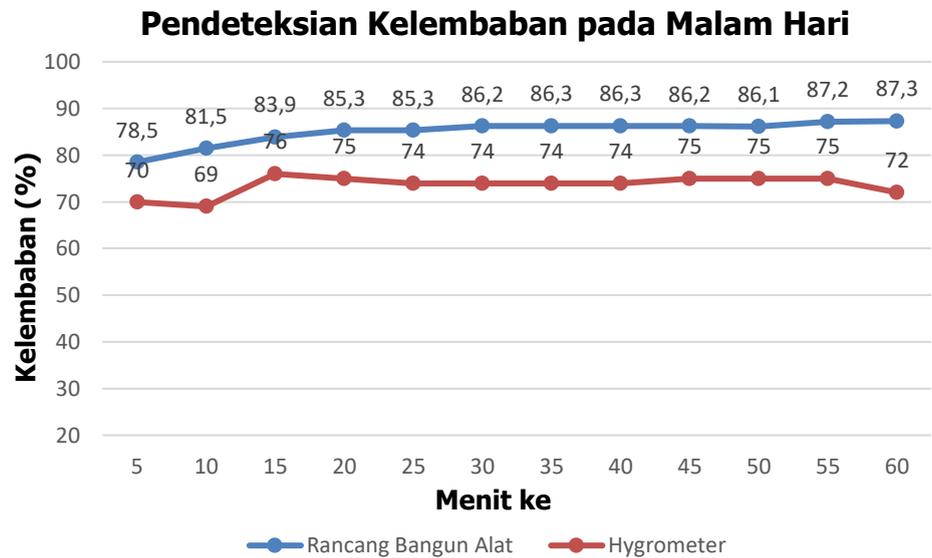
c. Malam Hari

Pengamatan dilakukan selama 60 menit dimulai pada pukul 00.00. Grafik menunjukkan perbandingan suhu yang terbaca pada alat rancangan dan thermometer setiap lima menit selama satu jam. Suhu alat rancangan berkisar antara 25,6 °C hingga 27,2 °C, sedangkan suhu hygrometer berada pada rentang 25,9 °C hingga 27,7 °C. Selisih terbesar terjadi pada menit ke-10 sebesar 4,3 °C, sedangkan selisih terkecil tercatat sebesar 0,1 °C pada menit ke-50. Rata-rata akurasi mencapai lebih dari 98%, dengan nilai tertinggi sebesar 99,6 % dan nilai terendah sebesar 95,7 %. Tren grafik menunjukkan kestabilan suhu pada kedua alat setelah menit ke-15. Ketelitian alat tergolong tinggi berdasarkan selisih yang relatif kecil sepanjang pengujian.



**Gambar IV.17** Perbandingan Pendeteksian Suhu pada Malam Hari

Pendeteksian pengamatan kelembaban dimulai pukul 00.00 selama 60 menit dan dilakukan bersamaan dengan pemantauan suhu. Grafik menunjukkan perbandingan antara pembacaan suhu alat rancangan dan hygrometer selama 60 menit. Nilai suhu alat mengalami sedikit fluktuasi antara 25,6 °C hingga 27,2 °C, sedangkan hygrometer berada pada rentang 25,9 °C hingga 27,7 °C. Selisih terbesar terjadi pada menit ke-10 sebesar 4,3 °C. Nilai akurasi tertinggi tercatat pada menit ke-15 dan ke-20 sebesar 99,2%. Rata-rata akurasi berada di atas 98% mencerminkan performa stabil dan presisi tinggi selama proses kalibrasi.



**Gambar IV.18** Perbandingan Pendeteksian Kelembaban pada Malam Hari

#### IV.1.5 Evaluasi (*Evaluate*)

Hasil kuesioner metode *System Usability Scale* (SUS) diperoleh dari 20 pengemudi kendaraan yang menggunakan rem angin yang sedang mengikuti uji kendaraan di Seksi Pengujian Kendaraan Bermotor Dinas Perhubungan Kota Surakarta. Nilai yang dikumpulkan selanjutnya diolah menggunakan metode perhitungan SUS untuk memperoleh tingkat kelayakan dan kegunaan alat.

$$\bar{x} = \frac{624 \times 2,5}{20}$$

$$\bar{x} = 78$$

Hasil penilaian dari 20 responden, diperoleh nilai *System Usability Scale* (SUS) sebesar 78 yang masuk dalam kategori B (Baik). Hasil penilaian menunjukkan alat berada pada tingkat kelayakan baik dengan peluang pengembangan lebih lanjut.

## IV.2 Percobaan Alat

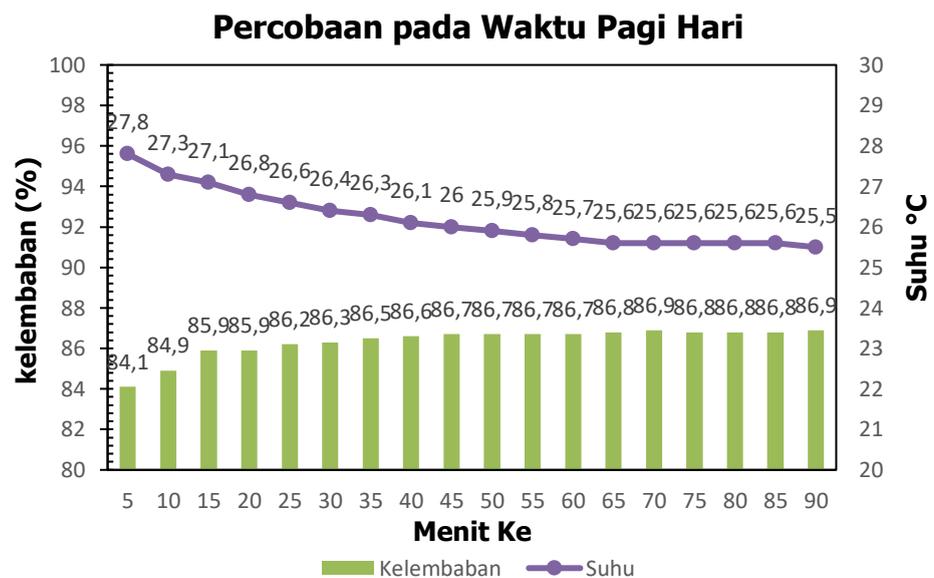
Percobaan alat dilakukan dengan pengamatan selama 90 menit menggunakan media simulasi tangki udara. Spesifikasi simulasi tangki udara yaitu :

1. Diameter (mm) : 270 mm
2. Tinggi (mm) : 346.5
3. Tekanan : 2 bar
4. Kapasitas : 19 liter
5. Material : Steel Plate 1 mm

#### IV.2.1 Percobaan Berdasarkan Waktu dan Suhu

##### a. Percobaan pada Waktu Pagi Hari

Percobaan pada waktu pagi hari menunjukkan perubahan suhu udara pada pagi hari mulai pukul 04.00 dalam interval 5 menit selama 90 menit. Suhu awal tercatat 27,8 °C pada menit ke-5. Mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 25,5 °C pada menit ke-90. Penurunan paling signifikan terjadi pada 30 menit pertama, dari 27,8 °C menjadi 26,4 °C. Menit ke-60 perubahan suhu mulai melambat dan cenderung stabil di kisaran 25,5–25,6°C. Pola grafik mencerminkan kondisi pendinginan alami udara saat mendekati fajar.



**Gambar IV.19** Percobaan pada Waktu Pagi hari

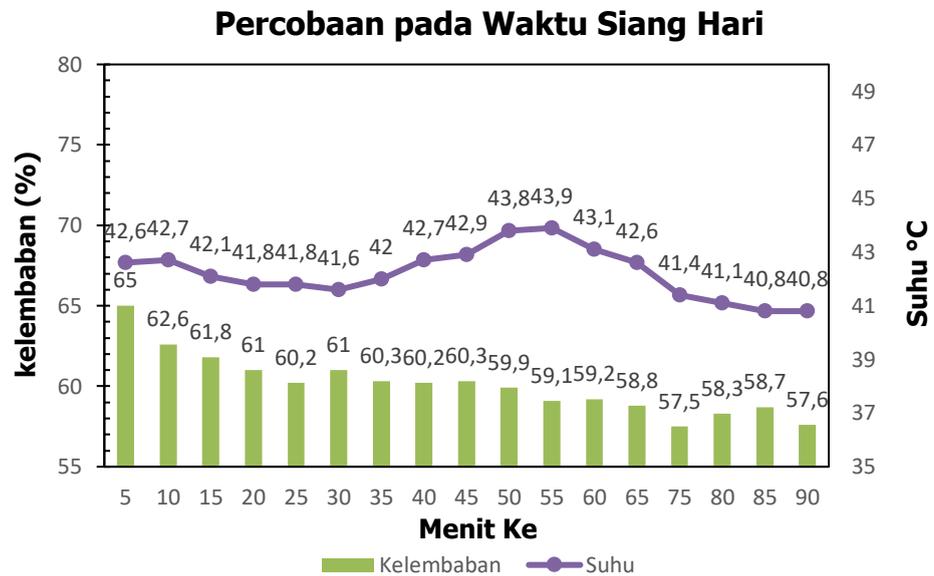
Rata-rata suhu tercatat sebesar 26,2°C dengan kelembaban rata-rata 86,3%. Nilai  $\rho_{\text{sat}}$  pada suhu 26,2°C mencapai 0,0251 kg/m<sup>3</sup> dan Volume ruang sebesar 19 liter, massa uap air yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\
&: \rho_{sat}(26,2 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{86,3}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\
&: 0,0251 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{86,3}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\
&: 0,0251 \text{ kg/m}^3 \times 0,863 \times 0,019 \text{ m}^3 \\
&: 0,000409925 \text{ kg/m}^3 \\
&: 0,410 \text{ gram/m}^3
\end{aligned}$$

Estimasi massa uap air sebesar 0,410 gram berasal dari suhu rata-rata 26,2 °C dan kelembaban relatif 86,3 % pada pagi hari. Nilai ini diperoleh dari hasil perkalian antara density (uap air jenuh) pada suhu tersebut ( $\rho_{sat}$ ) kelembaban relatif tinggi, dan volume udara 0,019 m<sup>3</sup>. Kelembaban 86,3% jauh melampaui batas ambang 70%, menunjukkan kondisi udara sangat lembap.. Estimasi 0,410 gram sesuai dengan karakteristik pagi hari yang sejuk dan lembap dengan kadar uap air tinggi namun tetap terbatas oleh suhu.

b. Percobaan pada Waktu Siang Hari

Percobaan dimulai pada pukul 13.00 dengan durasi pengamatan selama 90 menit. Suhu meningkat tajam pada menit ke-5 hingga ke-15 sebagai respons awal terhadap kondisi lingkungan, lalu naik secara bertahap hingga mencapai kestabilan antara menit ke-45 hingga ke-90. Nilai suhu yang tinggi disertai kelembaban berkisar antara 84,5 °C hingga 87 °C menunjukkan kondisi udara cenderung kering. Kelembaban turun signifikan pada menit ke-5 sampai ke-15, kemudian terus menurun hingga menit ke-75 disertai fluktuasi kecil, dengan kisaran antara 65 % hingga 57 %. Penurunan ini mencerminkan pengaruh suhu tinggi dan radiasi matahari yang memicu penguapan, di mana kelembaban tidak kembali ke nilai awal meskipun sempat mengalami variasi kecil setelah menit ke-75.



**Gambar IV.20** Percobaan pada Waktu Siang Hari

Rata-rata suhu tercatat sebesar 42,1°C dengan kelembaban 58,8%. Nilai  $\rho_{sat}$  pada suhu tersebut adalah 0,0251 kg/m<sup>3</sup>. Volume udara sebesar 19 liter menghasilkan perhitungan massa uap air sebagai berikut:

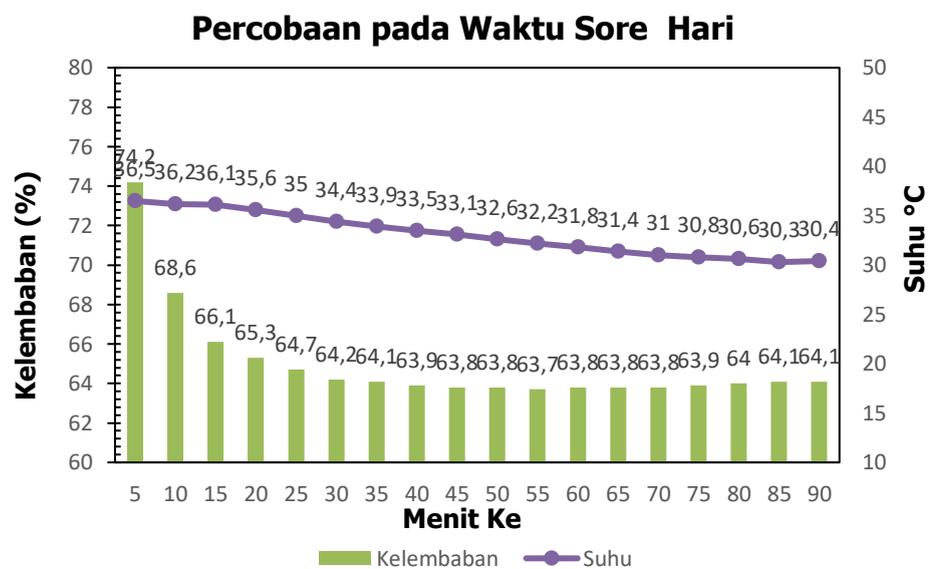
$$\begin{aligned}
 \text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\
 &: \rho_{sat}(42,1 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{58,8\%}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\
 &: 0,05777 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{58,8}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,05777 \text{ kg/m}^3 \times 0,588 \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,0006457416 \text{ kg/m}^3 \\
 &: 0,646 \text{ gram/m}^3
 \end{aligned}$$

Hasil menunjukkan kelembaban relatif siang hari lebih rendah yaitu 58,8% dibandingkan kelembaban pagi hari yang mencapai 86,3%. Kenaikan suhu dari 26,2°C menjadi 42,1°C meningkatkan kapasitas udara dalam menahan uap air, tercermin dari nilai  $\rho_{sat}$  sebesar 0,05777 kg/m<sup>3</sup>. Suhu berperan besar terhadap jumlah uap air aktual yang terkandung dalam udara.

c. Percobaan pada Waktu Sore Hari

Pengamatan dimulai pada sore hari pukul 16.00 yang menunjukkan penurunan suhu secara bertahap dari kisaran 36,5°C

hingga mencapai sekitar 31°C pada menit ke-90. Penurunan berlangsung konsisten tanpa fluktuasi tajam, mencerminkan transisi kondisi panas menuju lebih sejuk akibat menurunnya intensitas radiasi matahari. Sementara itu, kelembaban meningkat secara linier dari 68% menjadi sekitar 77%, mencerminkan akumulasi uap air di udara seiring penurunan suhu. Pola grafik menggambarkan kondisi termal dan kelembapan khas sore hari di ruang terbuka yang perlahan beralih menuju suasana malam dengan udara yang lebih lembap dan dingin.



**Gambar IV.21** Percobaan pada Waktu Sore Hari

Rata-rata suhu tercatat 34,2°C dan kelembaban 63,9%. Penurunan kelembaban terjadi bersamaan dengan pendinginan udara. Laju penurunan kelembaban berlangsung lebih lambat daripada penurunan suhu. Kondisi sore hari menggambarkan peralihan siang yang hangat menuju malam yang lebih sejuk. Estimasi massa uap air dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\
 &: \rho_{sat}(34,2 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{63,9}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\
 &: 0,0309 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{63,9}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,0309 \text{ kg/m}^3 \times 0,639 \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,000375157 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

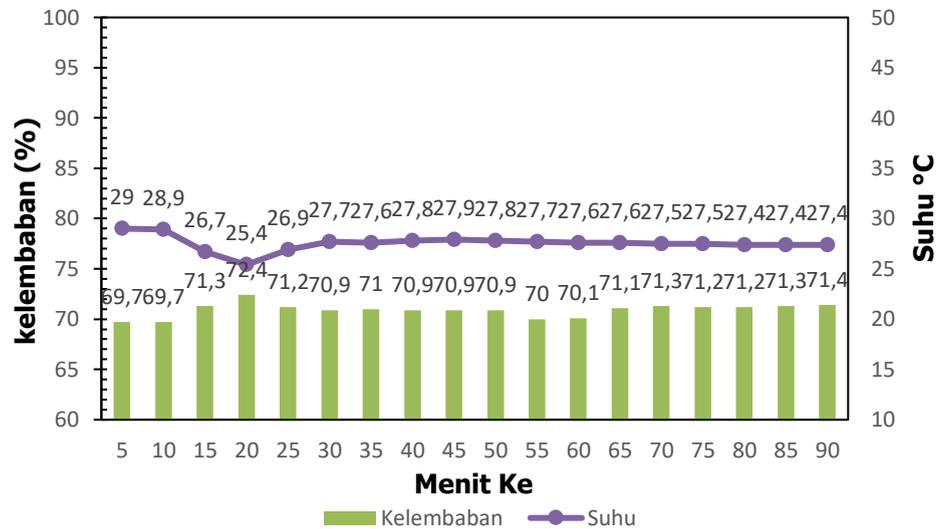
: 0,375 gram/m<sup>3</sup>

Suhu sore hari tercatat 34,2 °C lebih rendah dibandingkan siang hari yang mencapai 42,1 °C. Kelembaban meningkat dari 58,8 % pada siang menjadi 63,9 %. Estimasi massa uap air sebesar 0,483 gram berada di antara nilai pagi dan siang. Penurunan suhu menurunkan kapasitas udara dalam menahan uap air akibat nilai  $\rho_{\text{sat}}$  yang lebih rendah. Kelembaban relatif yang tetap tinggi menjaga kadar uap air tetap signifikan. Kondisi atmosfer pada sore hari menunjukkan keseimbangan antara pendinginan dan kandungan uap air.

d. Percobaan pada Waktu Malam Hari

Pengamatan dimulai pukul 19.00 menunjukkan penurunan suhu tajam antara menit ke-10 hingga ke-20 dari 28,9 °C menjadi 25,5 °C. Peningkatan terjadi hingga 27,7 °C pada menit ke-30 dan tetap stabil hingga akhir pengamatan. Pola fluktuatif pada awal grafik mengarah pada kemungkinan gangguan sensor atau kesalahan pembacaan. Kestabilan setelah menit ke-30 mengindikasikan kondisi termal malam hari yang relatif konstan. Nilai akhir berkisar antara 27,2 °C hingga 27,6 °C. Kelembaban mencapai puncak 72,7% pada menit ke-20, lalu menurun bertahap hingga menit ke-50 diikuti penurunan lebih tajam pada menit ke-55 dan kenaikan kembali setelah menit ke-60. Rentang nilai antara 70% hingga 72% mencerminkan kelembapan tinggi khas malam hari. Fluktuasi yang terjadi diduga disebabkan oleh faktor lingkungan sekitar atau gangguan sistem pengukuran.

### Percobaan pada Waktu Malam Hari



**Gambar IV.22** Percobaan Suhu pada Waktu Malam Hari

Rata-rata suhu malam hari adalah 27,5 °C dan kelembaban relatif 71,4%. Suhu malam hari cenderung lebih rendah karena tidak ada radiasi matahari, sementara kelembaban relatif justru meningkat akibat akumulasi uap air di udara. Kondisi selaras dengan karakteristik umum malam hari yang ditandai oleh pendinginan radiasi bumi, pembentukan embun, dan pergerakan udara lokal. Estimasi massa uap air dihitung dengan rumus :

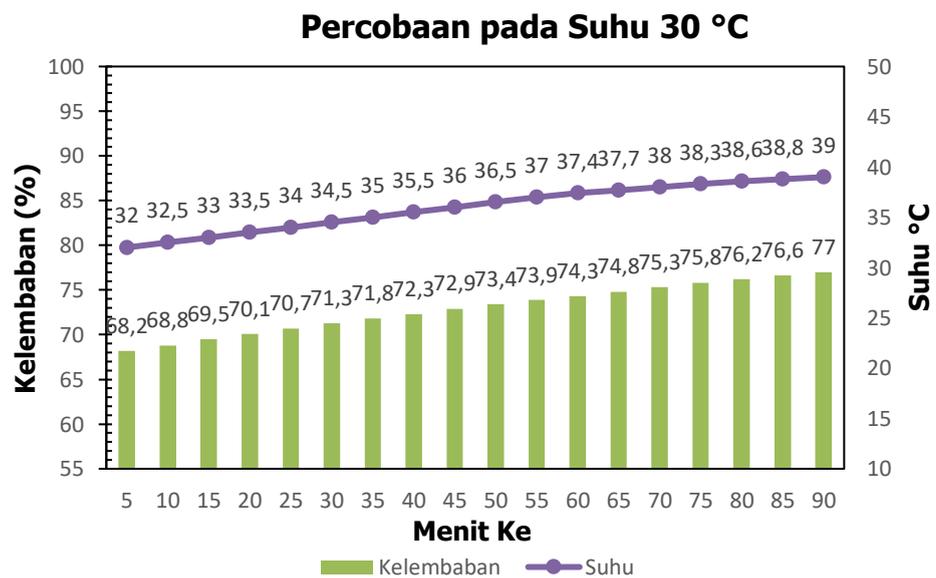
$$\begin{aligned}
 \text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\
 &: \rho_{sat}(27,5 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{71,4\%}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\
 &: 0,0268 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{71,4}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,0268 \text{ kg/m}^3 \times 0,714 \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,00036357 \text{ kg/m}^3 \\
 &: 0,364 \text{ gram/m}^3
 \end{aligned}$$

Rata-rata suhu sebesar 27,5 °C disertai rata-rata kelembaban relatif sebesar 71,4 % yang telah melampaui ambang batas alat 70 % menghasilkan massa uap air paling rendah yaitu 0,037 gram. Hasil 0,037 gram menunjukkan bahwa suhu memiliki pengaruh yang lebih besar dalam menentukan kapasitas udara untuk menampung uap air. Kelembaban yang tinggi tidak serta-merta meningkatkan kandungan

uap air apabila suhu tidak mencukupi. Udara bersuhu rendah memiliki keterbatasan dalam menyimpan uap air. Kadar uap air aktual sangat dipengaruhi oleh interaksi antara suhu dan kelembaban.

e. Percobaan pada suhu 30 °C

Pengamatan dilakukan selama 90 menit menggunakan metode pemanasan tangki dengan water heater. Suhu awal tangki mencapai 30°C yang diukur menggunakan thermogun. Suhu mengalami peningkatan bertahap dari 31°C hingga mencapai 38,8°C tanpa fluktuasi mencolok yang menunjukkan sistem pemanas bekerja secara stabil dan efisien. Pola grafik mencerminkan proses transfer panas yang berjalan optimal serta akumulasi energi termal yang berlangsung progresif selama 90 menit durasi pengamatan. Kelembaban meningkat secara konsisten dari kisaran 68% hingga mencapai sekitar 77%, sejalan dengan peningkatan suhu. Grafik kelembaban menunjukkan akumulasi uap air yang berlangsung stabil akibat proses penguapan mencerminkan respons udara terhadap suhu yang terus meningkat di dalam tangki.



**Gambar IV.23** Percobaan Suhu pada Suhu 30 °C

Rata-rata suhu tercatat sebesar 37,4°C dan kelembaban rata-rata mencapai 72,2%. Peningkatan suhu secara bertahap akibat pemanasan oleh komponen seperti water heater menyebabkan naiknya

kelembaban. Udara yang lebih hangat memiliki kemampuan menampung uap air lebih besar. Kendaraan dalam keadaan idle tetap menghasilkan panas yang memengaruhi lingkungan mikro dalam tangki udara khususnya terhadap kadar kelembaban. Estimasi massa uap air kemudian dihitung menggunakan rumus yang telah ditetapkan berdasarkan nilai suhu dan kelembaban tersebut.

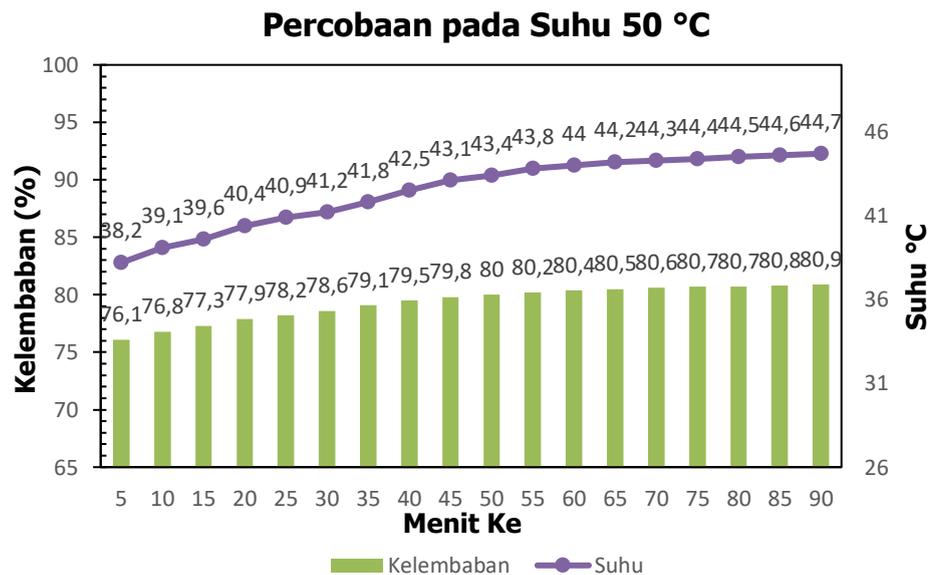
$$\begin{aligned}
 \text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\
 &: \rho_{sat}(37,4 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{72,2 \text{ \%}}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\
 &: 0,0455 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{72,2 \text{ \%}}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\
 &: 0,0455 \text{ kg/m}^3 \times 0,722 \times 0,19 \text{ m}^3 \\
 &: 0,00062417 \text{ kg/m}^3 \\
 &: 0,624 \text{ gram/m}^3
 \end{aligned}$$

Hasil pengamatan menunjukkan kondisi idle pada suhu rata-rata 37,4 °C dan kelembaban relatif 72,2 % menghasilkan estimasi massa uap air sebesar 0,061 gram. Kelembaban relatif yang melebihi ambang batas 70 % tidak serta-merta menghasilkan uap air dalam jumlah signifikan. Suhu rendah membatasi kapasitas udara menahan uap air sehingga akumulasi tetap rendah dibanding kondisi siang atau sore. Grafik suhu dan kelembaban menunjukkan kecenderungan stabil naik sebagai respons terhadap pemanasan tangki. Proses pemuain udara akibat peningkatan suhu mencapai 30 °C menyebabkan molekul air mendekati titik jenuh uap, meningkatkan tekanan parsial uap air tanpa menghasilkan kondensasi yang berarti. Kestabilan grafik mengindikasikan pencapaian kesetimbangan termal dalam ruang tertutup tangki yang dipengaruhi langsung oleh distribusi panas merata pada permukaan logam.

f. Percobaan pada suhu 50 °C

Pengamatan dilakukan selama 90 menit dengan metode pemanasan tangki menggunakan water heater. Suhu awal tangki dipanaskan hingga 50 °C dan diukur menggunakan thermogun. Suhu meningkat secara bertahap dari 38 °C hingga mencapai sekitar 44,6 °C

pada menit ke-90 tanpa menunjukkan fluktuasi ekstrem. Menit ke-60 laju kenaikan suhu mulai melambat menunjukkan proses perpindahan panas mendekati titik jenuh termal. Pola grafik menunjukkan karakteristik umum pemanasan ketika suhu media mendekati suhu sumber panas. Kelembaban naik secara bertahap dari 76% hingga sekitar 81% dengan laju peningkatan lebih cepat di awal pengamatan dan melandai setelah menit ke-60. Tren menunjukkan proses penguapan di dalam sistem tertutup akibat kenaikan suhu dan perlambatan di akhir pengamatan yang menandakan mendekati titik jenuh uap dalam volume udara terbatas di dalam tangki.



**Gambar IV.24** Percobaan Suhu pada Suhu 50 °C

Rata-rata suhu selama simulasi idle dengan pemanasan 50 °C tercatat sebesar 44,1 °C disertai kelembaban relatif sebesar 79,9%. Simulasi pemanasan 30 °C menunjukkan suhu rata-rata 37,4 °C dengan kelembaban relatif 72,2%. Peningkatan nilai suhu dan kelembaban tersebut mengindikasikan bahwa suhu tinggi berperan dalam meningkatkan kapasitas udara untuk menyimpan uap air.

Proses idle peningkatan suhu secara bertahap menyebabkan kenaikan kelembaban relatif. Akumulasi uap air menjadi lebih besar pada suhu tinggi dan berpotensi menurunkan kualitas udara kering, terutama di ruang tertutup seperti tangki udara. Estimasi massa uap air

pada suhu 44,1 °C dan kelembaban 79,9% dihitung menggunakan persamaan :

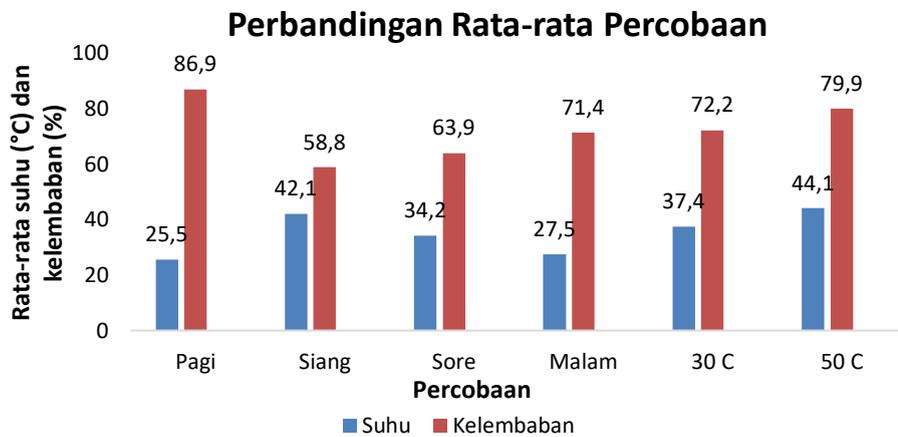
$$\begin{aligned}\text{Massa Uap Air (Gram)} &: \rho_{sat}(T) \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times V \\ &: \rho_{sat}(44,1 \text{ } ^\circ\text{C}) \times \left(\frac{79,9\%}{100}\right) \times 19 \text{ L} \\ &: 0,0641 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{79,9}{100}\right) \times 0,019 \text{ m}^3 \\ &: 0,000973102 \text{ kg/m}^3 \\ &: 0,973 \text{ gram/m}^3\end{aligned}$$

Hasil menunjukkan bahwa pada kondisi simulasi kendaraan beroperasi dengan suhu rata-rata 44,1 °C, kelembaban relatif 79,9 % dan estimasi massa uap air mencapai 0,112 gram. Nilai 0,112 gram lebih tinggi dibandingkan kondisi ketika suhu rata-rata mencapai 37,4 °C dengan massa uap air sebesar 0,061 gram. Densitas uap air jenuh mengalami peningkatan seiring bertambahnya suhu udara. Kedua kondisi menunjukkan kelembaban relatif melebihi ambang 70 %. Suhu berperan sebagai variabel dominan dalam menentukan kandungan uap air. Grafik suhu dan kelembaban menunjukkan kurva stabil naik akibat pemanasan tangki mencapai suhu 50 °C. Pemuaiian udara memicu peningkatan tekanan parsial uap air dan mempercepat tercapainya titik jenuh. Udara terperangkap dalam ruang terbatas sehingga distribusi panas berlangsung merata dan mendorong peningkatan kapasitas udara menyerap kelembaban tanpa membentuk embun. Kenaikan temperatur logam tangki menghasilkan efek termal langsung terhadap fluktuasi parameter udara terukur.

#### IV.2.2 Perbandingan Percobaan Waktu dan Estimasi Uap Air

##### a. Perbandingan Percobaan Waktu

Rata-rata suhu dan kelembaban menunjukkan perbedaan karakteristik berdasarkan waktu pengamatan serta variasi suhu tangki. Nilai kelembaban tertinggi tercatat pada pagi hari sebesar 86,9 % bersamaan dengan suhu terendah yaitu 25,5 °C. Udara dingin pada pagi hari memiliki kapasitas rendah dalam menyimpan uap air yang menyebabkan peningkatan nilai kelembaban relatif.



**Gambar IV.25** Perbandingan Rata-rata Percobaan

Siang hari tercatat suhu rata-rata 42,1°C dengan penurunan kelembaban hingga 58,8 %. Udara panas mampu menahan lebih banyak uap air yang menghasilkan kelembaban relatif yang lebih rendah. Sore hari menunjukkan suhu 34,2°C dan kelembaban 63,9 %. Malam hari mencatat suhu 27,5°C dan kelembaban 71,4 %. Pola ini mengikuti siklus termal harian yang memengaruhi distribusi uap air di udara.

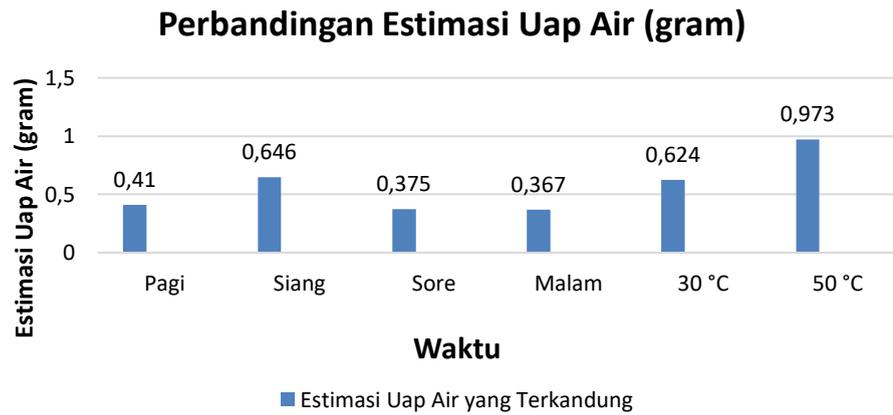
Variasi suhu tangki memperlihatkan bahwa pemanasan internal mendorong peningkatan kelembaban. Tangki bersuhu 30°C menghasilkan suhu rata-rata 37,4°C dan kelembaban 72,2 %. Tangki bersuhu 50°C menunjukkan suhu 44,1°C dan kelembaban meningkat menjadi 79,9 %. Pemanasan dari dalam tangki menyebabkan penguapan sisa air di dinding atau dasar yang menambah kandungan uap air di ruang tertutup.

Hasil pengamatan memperkuat bahwa suhu internal ruang tertutup seperti tangki udara kendaraan mempengaruhi terbentuknya kelembaban. Kondisi keadaan ini dapat berisiko mengganggu kinerja sistem berbasis udara tekan misalnya rem pneumatik.

b. Perbandingan Estimasi Uap Air

Grafik menunjukkan estimasi uap air dalam tangki udara berdasarkan waktu pagi, siang, sore, malam dan suhu (30°C dan 50°C). Estimasi tertinggi terjadi pada percobaan 50 °C sebesar 0,973

gram, diikuti siang (0,646 gram) dan 30 °C (0,624 gram) seiring suhu dan kelembaban yang tinggi. Estimasi malam hari turun drastis menjadi 0,367 gram karena suhu rendah dan kelembaban yang stabil.



**Gambar IV.26** Perbandingan Estimasi Uap Air

Simulasi suhu tetap uap air tercatat 0,973 gram (50°C) dan 0,646 gram (siang) menunjukkan bahwa peningkatan suhu turut meningkatkan kandungan uap air meski tanpa pengaruh lingkungan. Temuan hasil percobaan menegaskan pentingnya pengendalian kelembaban untuk mencegah kondensasi dalam tangki udara.