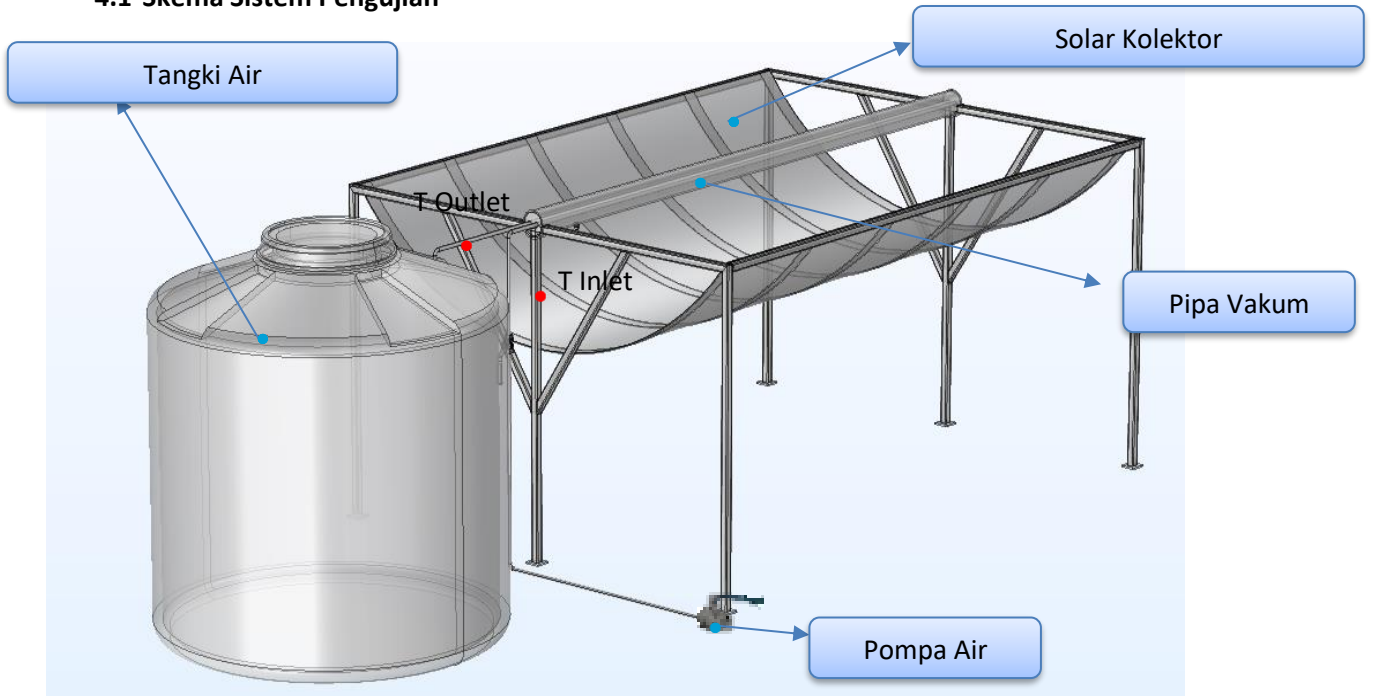
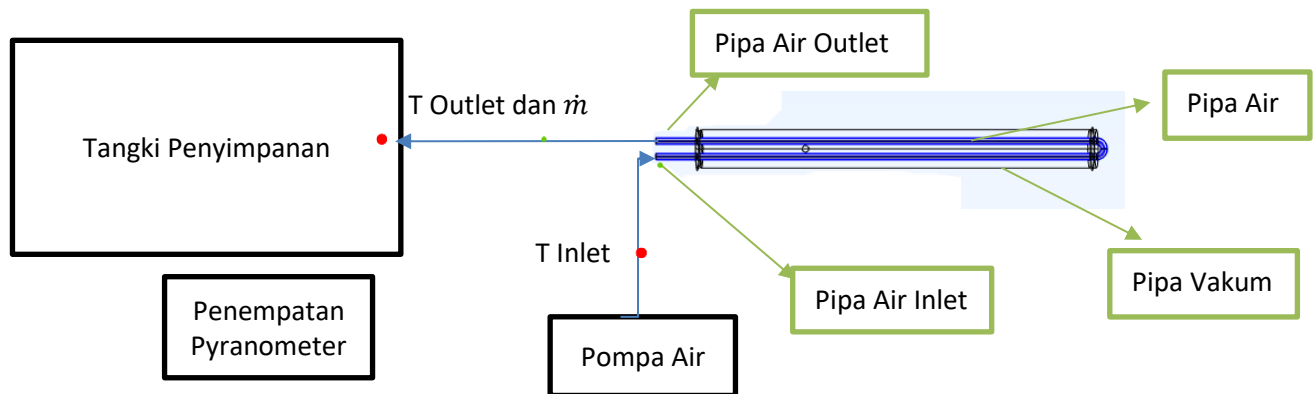


4. ANALISA DATA

4.1 Skema Sistem Pengujian



Gambar 4.1 Gambar Sistem Pipa Vakum dengan Tenaga Solar Kolektor



Gambar 4.2 Skema Pengukuran Intensitas Radiasi, Temperatur Air, dan *Mass Flow Rate*

Gambar 4.1 merupakan solar kolektor yang akan digunakan pada pengujian. Gambar 4.2 menggambarkan skema pengujian. Sistem pemanas air tenaga surya dengan pipa vakum. Pengukuran

intensitas radiasi matahari yang diterima oleh kolektor surya dilakukan menggunakan multimeter. Hal ini untuk memastikan bahwa sistem menerima jumlah energi matahari yang cukup selama periode pengujian. Intensitas radiasi sangat mempengaruhi efisiensi perpindahan panas, sehingga pencatatannya dilakukan secara berkala guna melihat perubahan yang terjadi akibat faktor lingkungan seperti pergerakan matahari atau kondisi cuaca.

Setelah intensitas radiasi tercatat, langkah selanjutnya adalah mengukur suhu awal air masuk atau T inlet sebelum dipanaskan oleh sistem. Pengukuran ini bertujuan untuk mendapatkan data awal yang akan digunakan sebagai acuan dalam perhitungan efisiensi pemanasan. Suhu T inlet dicatat sebelum air mengalir ke kolektor surya agar dapat dibandingkan dengan suhu setelah proses pemanasan berlangsung.

Bersamaan dengan pengukuran intensitas radiasi juga dilakukan pengukuran temperatur air keluar atau T outlet, yang diukur setiap 30 menit untuk memantau perubahan suhu akibat proses pemanasan dalam sistem. Pengujian dilakukan dalam rentang waktu antara pukul 07.00 hingga 11.00, saat intensitas matahari berada pada kondisi optimal untuk pemanasan. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan Huato S220-T8 Thermocouple Thermometer Data Logger, tempat pengukuran berada pada posisi T inlet dan T outlet seperti pada Gambar 4.2. Selain itu, pengukuran \dot{m} juga berada pada posisi pengukuran T outlet menggunakan gelas ukur dan timer. Data yang diperoleh dari suhu T inlet dan T outlet dianalisis untuk menentukan efisiensi pemanasan sistem dan memahami bagaimana variasi radiasi matahari mempengaruhi kinerja pemanas air tenaga surya. Pengukuran akan mengikuti Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Rancangan Pengujian

Waktu	Tekanan Vakum	T_inlet (°C)	T_outlet (°C)	Intensitas Radiasi (W/m ²)	Efisiensi (%)	Flow Rate (kg/s)	Tegangan (V)

Dengan mengikuti skema ini, pengujian dilakukan secara sistematis guna memastikan bahwa data yang dikumpulkan mencerminkan performa aktual sistem. Hasil pengujian ini akan digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem serta mengidentifikasi potensi perbaikan sistem tekanan vakum guna meningkatkan efisiensi pemanasan air menggunakan energi surya.



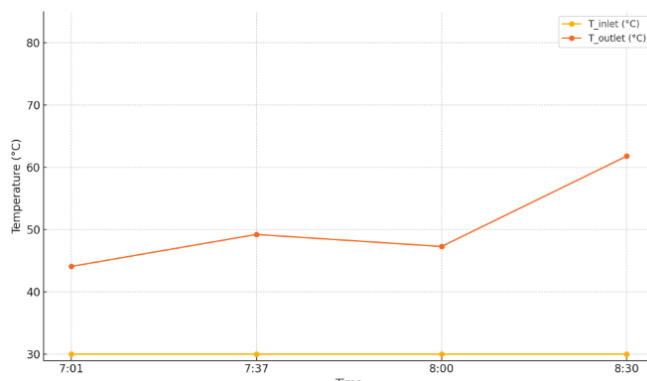
Gambar 4.3 Pengujian Intensitas Matahari menggunakan kombinasi Pyranometer dan Multimeter Analog Krisbow KW06-299
Sumber: Dokumen Pribadi

4.2 Data Hasil Percobaan

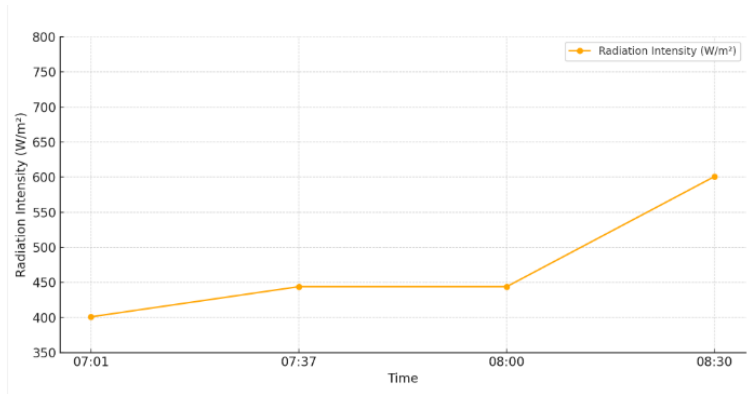
Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh dua tingkat tekanan vakum—500 mmHg sebagai kondisi referensi dan 300 mmHg untuk menilai efek isolasi termal lebih tinggi—terhadap efisiensi pemanas air tenaga surya. Tekanan 500 mmHg dipilih untuk mengurangi kehilangan panas konvektif, sedangkan 300 mmHg diharapkan mampu meminimalkan heat losses lebih lanjut. Dengan membandingkan kedua kondisi ini, diharapkan dapat diidentifikasi tekanan vakum optimal yang memberikan peningkatan efisiensi paling signifikan.

Eksperimen dilaksanakan di Universitas Kristen Petra melalui lima kali pengujian pada hari terpisah, dengan data hasil yang mencakup enam hari pengamatan. Setiap pengujian mencatat suhu air masuk dan keluar serta intensitas radiasi matahari untuk masing-masing kondisi tekanan, menyediakan basis empiris yang kuat untuk mengevaluasi bagaimana variasi vakum memengaruhi kinerja termal sistem. Pengujian di tekanan vakum 500 mmHg:

- Hari Pertama:

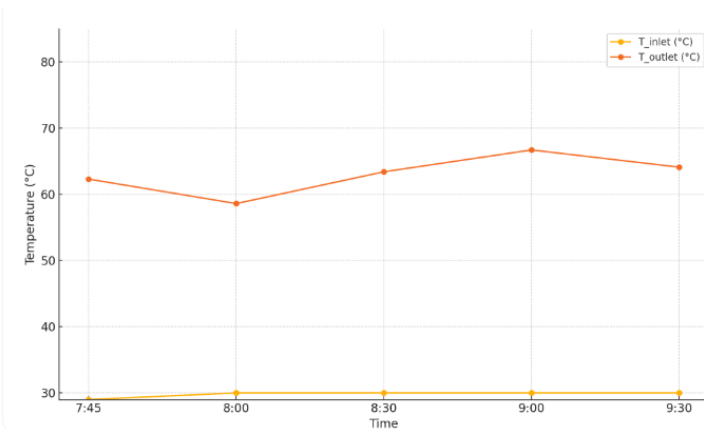


Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Pertama

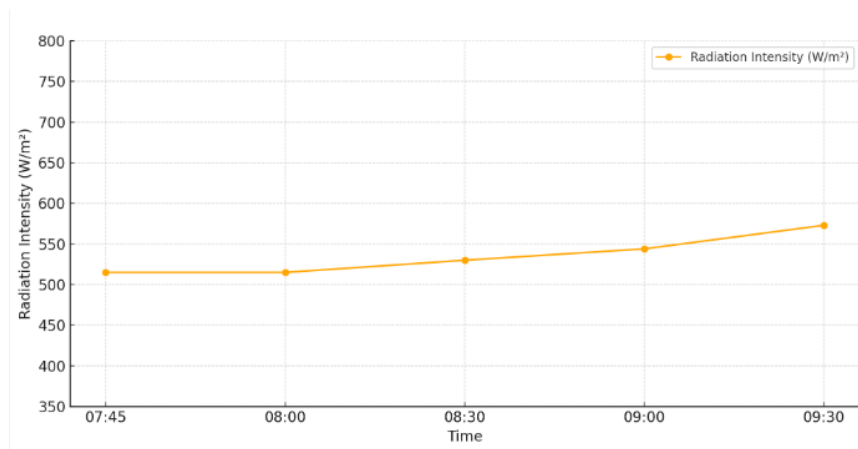


Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Pertama

- Hari Kedua:

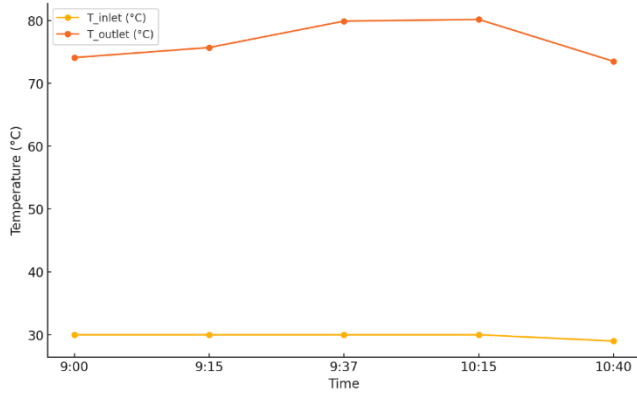


Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Kedua

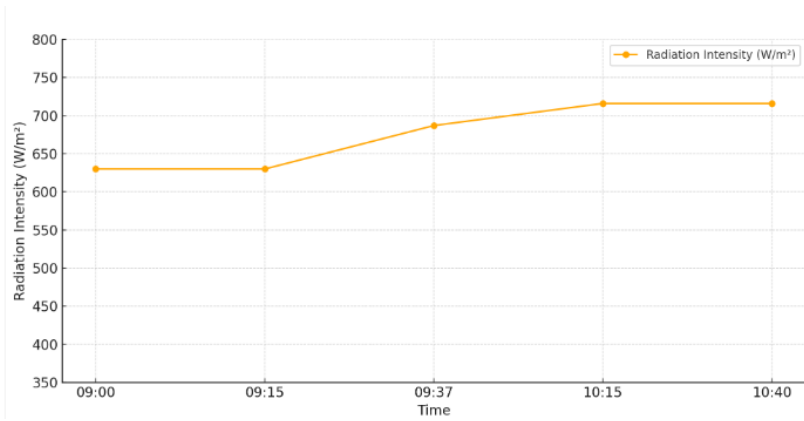


Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Kedua

- Hari Ketiga:



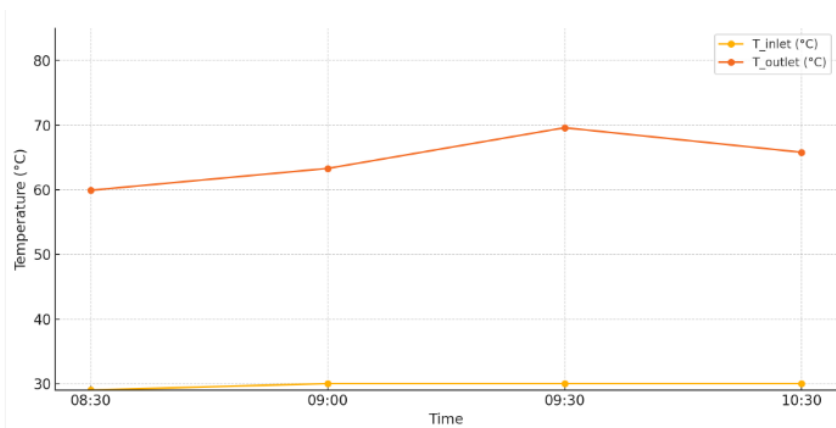
Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Ketiga



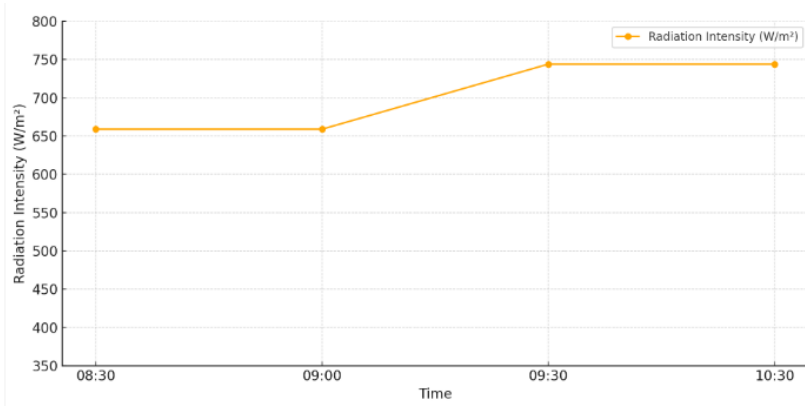
Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 500 mmHg Hari Ketiga

Pengujian di hari keempat sampai keenam menggunakan tekanan vakum 300 mmHg:

- Hari Keempat:

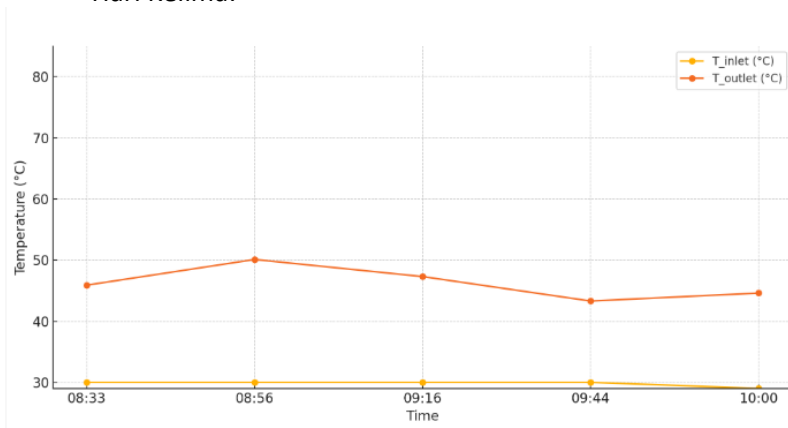


Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Keempat

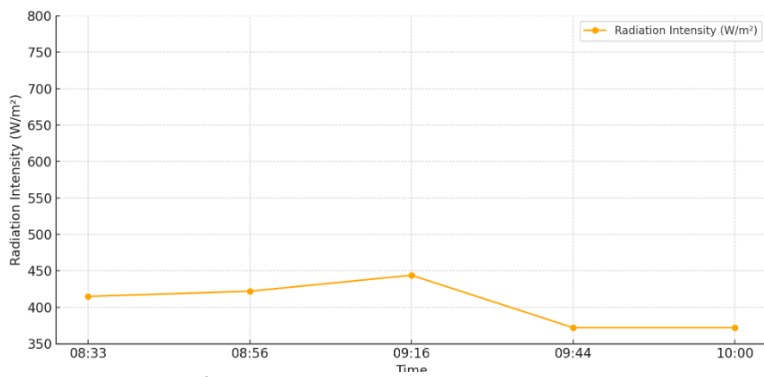


Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Keempat

- Hari Kelima:

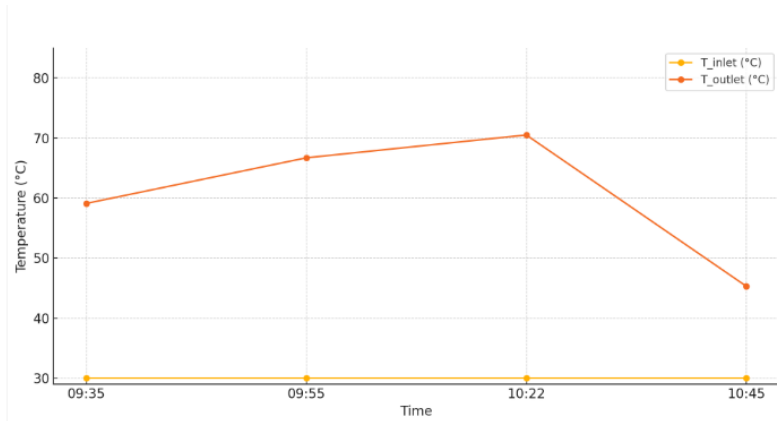


Gambar 4.12 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Kelima

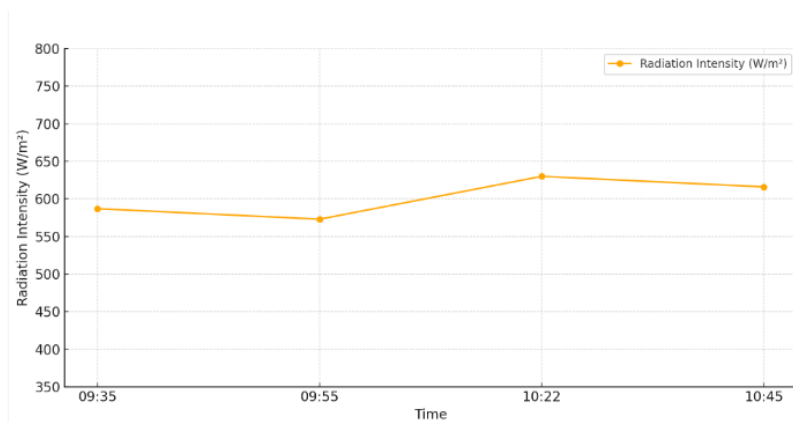


Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Kelima

- Hari Keenam:



Gambar 4.14 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Keenam



Gambar 4.15 Grafik Hasil Pengukuran Intensitas Radiasi Tekanan Vakum 300 mmHg Hari Keenam

Perhitungan efisiensi menggunakan rumus sebagai berikut;

$$\eta = \frac{(T_{water\ ex} - T_{water\ in}) \dot{m} C_{p\ water}}{I A_c}$$

Untuk menentukan laju aliran massa (\dot{m}) air, dilakukan pengukuran menggunakan gelas ukur. Dari hasil pengukuran diperoleh rata-rata 440 mL air dalam waktu 15 detik, yang setara dengan 29,3 mL/s.

Karena densitas air sekitar 1 g/mL, nilai ini dikonversi langsung menjadi 0,0293 kg/s.

Contoh Perhitungan Hari Pertama:

$$\eta = \frac{(61.8 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{601 \times 0.159} = 40.7\%$$

Contoh Perhitungan Hari Kedua:

$$\eta = \frac{(66.7 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{544 \times 0.159} = 51.9\%$$

Contoh Perhitungan Hari Ketiga:

$$\eta = \frac{(80.2 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{716 \times 0.159} = 53.9\%$$

Contoh Perhitungan Hari Keempat:

$$\eta = \frac{(69.6 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{744 \times 0.159} = 40.9\%$$

Contoh Perhitungan Hari Kelima:

$$\eta = \frac{(50.1 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{422 \times 0.159} = 36.6\%$$

Contoh Perhitungan Hari Keenam:

$$\eta = \frac{(70.5 - 30) \times 0.0293 \times 4180.5}{630 \times 0.159} = 49.4$$

4.3 Analisis Statistik

Untuk mengevaluasi pengaruh tekanan vakum terhadap efisiensi sistem pemanas air tenaga surya, dilakukan Analisis Varians (ANOVA). Metode statistik ini memungkinkan menentukan apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata efisiensi pada berbagai tingkat tekanan vakum. Hasil Eksperimen yang tertera pada lampiran 2 dikelompokkan menjadi dua grup:

- Grup 1: Pengukuran efisiensi pemanas air tenaga surya pada tekanan vakum 500 mmHg.
- Grup 2: Pengukuran pada tekanan vakum 300 mmHg.

Dengan membandingkan kedua grup ini, bertujuan untuk memahami bagaimana variasi tekanan vakum memengaruhi kinerja sistem. Hasil ANOVA yang diperoleh:

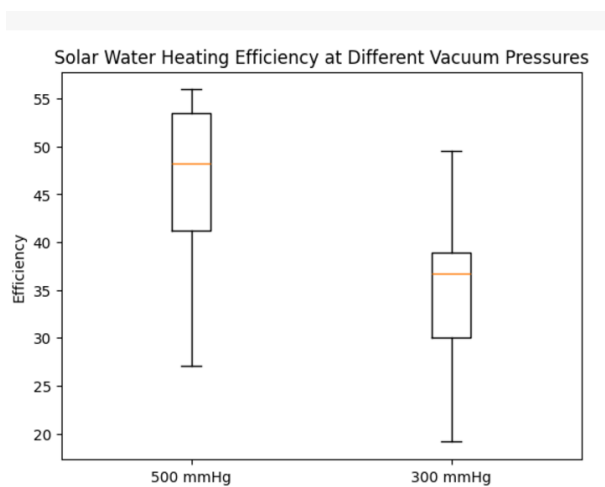
```
Number of groups (k): 2
Total observations (N): 27
Degrees of freedom between groups: 1
Degrees of freedom within groups: 25
Group 1 mean: 45.558
Group 2 mean: 35.7847
Overall mean: 40.8524
Sum of Squares Between Groups (SSB): 643.8617
Sum of Squares Within Groups (SSW): 2033.6658
Mean Square Between Groups (MSB): 643.8617
Mean Square Within Groups (MSW): 81.3466
F-statistic: 7.915
```

Gambar 4. 16 Hasil Data Python Menggunakan Google Colab

Pada analisis ANOVA satu arah ini, kita membandingkan rata-rata dua kelompok ($k = 2$) dari total 27 observasi. Kelompok 1 memiliki rata-rata 45,558 dan Kelompok 2 sebesar 35,785, dengan rata-rata keseluruhan 40,852. Variabilitas antar kelompok diukur oleh Sum of Squares Between Groups (SSB) sebesar 643,862, sedangkan variabilitas dalam kelompok diukur oleh Sum of Squares Within

Groups (SSW) sebesar 2.033,666. Setelah dibagi derajat kebebasan masing-masing ($df_{B} = 1$, $df_{W} = 25$), diperoleh Mean Square Between (MSB) = 643,862 dan Mean Square Within (MSW) = 81,347.

Nilai F-statistic sebesar 7,915 diperoleh dari perbandingan MSB dan MSW ($F = MSB/MSW$). Karena nilai F ini lebih besar dari nilai kritis pada $df_1 = 1$ dan $df_2 = 25$ di tingkat signifikansi 5% (sekitar 4,24), kita menolak hipotesis nol yang menyatakan bahwa kedua rata-rata kelompok sama. Dengan demikian, perbedaan rata-rata antara Kelompok 1 dan Kelompok 2 dianggap signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa faktor pembeda kedua kelompok memang berpengaruh nyata terhadap hasil pengukuran.

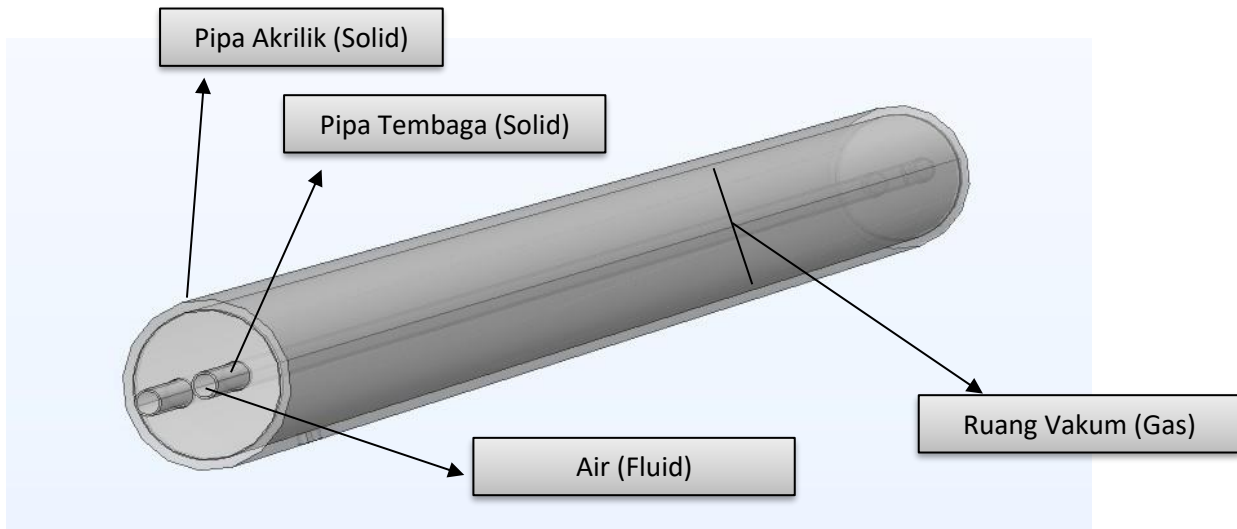


Gambar 4. 17 Boxplot Grafik menggambarkan Efisiensi Pemanasan

4.4 Simulasi Numerik dengan COMSOL

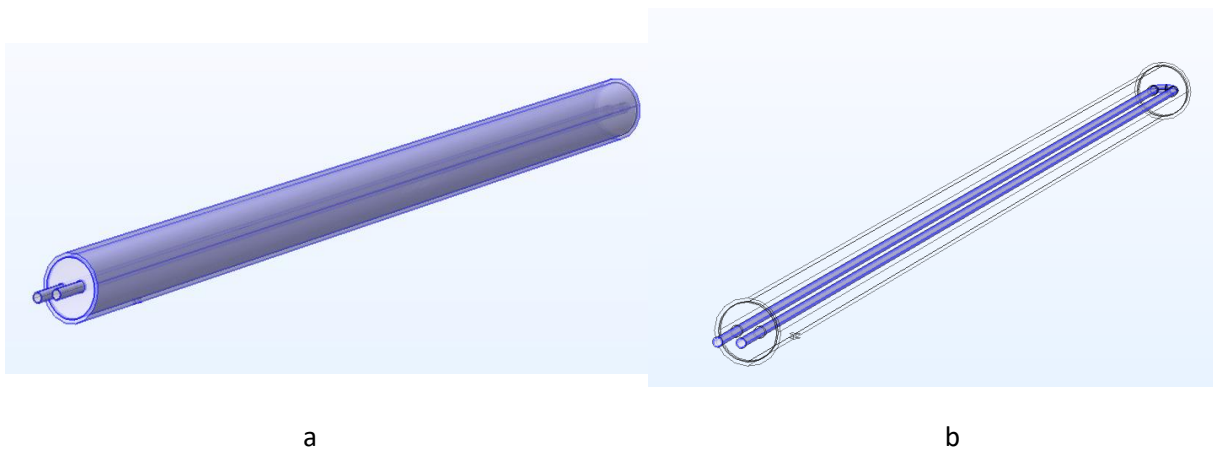
4.4.1 Domain dan Meshing

Simulasi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak COMSOL untuk mengintegrasikan berbagai antarmuka fisika secara mendetail. Analisis termal dalam investigasi ini dilakukan dalam lingkungan simulasi yang memungkinkan interaksi yang terperinci antara konduksi pada material padat, aliran fluida, dan pertukaran radiasi. Pendekatan ini berpusat pada pembuatan model geometris representatif, di mana pipa absorber, lapisan vakum di sekitarnya, dan pelindung akrilik secara sistematis diintegrasikan. Pada Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa dalam domain virtual ini, semua material yang relevan—tembaga untuk pipa absorber, air sebagai fluida kerja, akrilik sebagai lapisan luar transparan, dan ruang vakum di antaranya—diberikan sifat-sifat yang diambil dari perpustakaan material yang sudah mapan, memastikan karakteristik termofisikanya mencerminkan kondisi dunia nyata.



Gambar 4.18 Desain Geometri pada Software COMSOL Multiphysics

Pada Gambar 4.18, terlihat bahwa sistem ini terdiri atas pipa akrilik, pipa tembaga, ruang vakum, dan air di dalam pipa tembaga. Pipa akrilik berada di bagian paling luar sehingga membentuk tabung pelindung yang transparan. Di dalamnya, terpasang pipa tembaga yang menjadi jalur utama untuk aliran air masuk (inlet) dan keluar (outlet). Di antara kedua pipa tersebut, terdapat ruang vakum yang berfungsi sebagai area hampa untuk meminimalkan perpindahan panas secara konvektif. Karena perilaku termal model sangat bergantung pada definisi yang tepat, perhatian khusus diberikan pada penggabungan *interface* perpindahan panas.



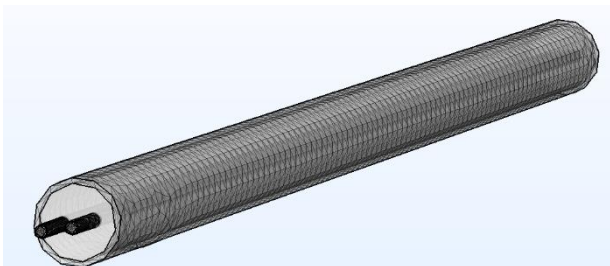
Gambar 4.19 Domain Selection *Heat Transfer in Solids* dan *Surface-to-Surface Radiation* (a), *Heat Transfer in Fluids* (b)

Pada Gambar 4.19 (a) menyorot domain padat—pipa tembaga atau tabung kaca—di mana antarmuka “Heat Transfer in Solids” menghitung perpindahan panas konduksi dalam material padat, sedangkan antarmuka “Surface-to-Surface Radiation” memodelkan pertukaran radiasi

antarpermukaan boundary. Visualisasi pada gambar ini sama-sama menampilkan geometri solid, tetapi dengan konteks fisika yang berbeda: konduksi di dalam material versus radiasi gelombang elektromagnetik antarpermukaan. Meskipun kedua antarmuka melihat geometri 3D yang sama, setiap antarmuka melakukan analisis berbeda sesuai perannya. “Heat Transfer in Solids” fokus pada perhitungan konduksi di dalam padatan, sementara “Surface-to-Surface Radiation” menetapkan interaksi radiasi antara permukaan. Karena keduanya merujuk pada objek fisik yang identik, tampilan domain selection untuk masing-masing antarmuka tetap serupa, hanya logika fisiknya yang berbeda.

Sebaliknya, Gambar 4.19(b) menampilkan domain fluida, yaitu volume yang dialiri air. Antarmuka “Heat Transfer in Fluids” menghitung perpindahan panas melalui konduksi dan konveksi di dalam fluida, menyorot wilayah transparan tempat aliran berlangsung. Setelah semua antarmuka dideklarasikan—padat, radiasi, dan fluida—langkah selanjutnya adalah meshing, yang menyubdisi keseluruhan geometri menjadi elemen-elemen kecil untuk analisis numerik yang akurat.

Mesh kasar (“coarse”) dan mesh halus (“fine”) memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing dalam simulasi numerik. Mesh kasar menggunakan lebih sedikit elemen, sehingga waktu komputasi lebih singkat dan kebutuhan sumber daya lebih rendah—cocok untuk preview awal atau area yang tidak kritis. Meski kadang secara kebetulan mesh kasar dapat “membatalkan” kesalahan diskritisasi pada mekanisme perpindahan panas (misalnya meremehkan radiasi namun melebihkan konveksi), hasil semacam ini tak dapat diandalkan untuk analisis akhir, karena detail gradien suhu atau kecepatan tajam sering terlewat. Sebaliknya, mesh halus menempatkan elemen rapat di area kritis, mampu menangkap variasi gradien suhu, kecepatan, dan fenomena fisik lain dengan akurasi tinggi. Diskritisasi yang lebih detail meminimalkan kesalahan numerik, tetapi membutuhkan waktu komputasi lebih lama dan memori lebih besar—seiring bertambah halusnya mesh, jumlah elemen dan simpul meningkat tajam. Oleh karena itu, pemilihan antara mesh kasar dan halus harus mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan akurasi dan biaya komputasi serta sumber daya yang tersedia. Gambar 4.20 menunjukkan contoh mesh halus dengan pengaturan element size “Fine.”



Gambar 4.20 Plot Meshing dengan Element Size “Fine”

4.4.2 Boundary Condition dan Parameter Input

Selain menetapkan domain dan mesh, tahap berikutnya adalah menentukan kondisi batas (boundary conditions) serta parameter fisik yang diperlukan, sebagaimana tercantum pada Gambar 4.20. Pada *Heat Transfer in Solids*, pipa tembaga diatur dengan nilai konduktivitas sesuai data material, sementara pada *Heat Transfer in Fluids*, laju aliran air ditetapkan berdasarkan hasil pengukuran mass flow rate sebesar 29,3 mL/s (setara dengan 0,0293 kg/s) pada posisi seperti pada gambar 4.2. Nilai ini diubah menjadi kecepatan masuk (inlet velocity) pada saluran masuk pipa. Untuk mencerminkan kondisi eksperimen, suhu inlet (T_{inlet}) ditetapkan sekitar 303,15 K (30 °C).

Karena ruang vakum juga dilibatkan, antarmuka Surface-to-Surface Radiation diaktifkan guna menghitung perpindahan panas secara radiasi di antara permukaan internal. Dalam hal ini, parameter radiasi seperti emisivitas (α), *absorptivity*, dan suhu dinding ditentukan agar mewakili keadaan kolektor surya secara realistis. Ruang vakum di sekitar pipa sengaja dirancang untuk menekan konduksi dan konveksi, sehingga aliran panas terutama berlangsung melalui radiasi. Hal ini tercermin dari pengaturan P_{vacuum} (500 mmHg), k_{vacuum} (0,015 W/(m·K) pada tekanan tersebut), serta ρ_{vacuum} yang jauh lebih rendah daripada udara bertekanan normal. Dalam simulasi ini, parameter-parameter lain meliputi h_{conv} untuk memodelkan koefisien perpindahan panas konvektif pada permukaan terbuka, G untuk intensitas radiasi matahari (401 W/m²), $T_{ambient}$ (298,15 K atau 25 °C) untuk lingkungan sekitar, serta sifat fisik fluida (c_p_{water} , R_{air} , c_p_{vacuum}). Dengan memasukkan semua informasi tersebut, perangkat lunak simulasi dapat memprediksi distribusi suhu dan fluks panas secara tepat sesuai kondisi eksperimen.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
alpha	0.95	0.95	Absorptivity of pipe surfa...
T_ambient	25[degC]	298.15 K	Ambient temperature
A_collector	15.9[m^2]	15.9 m ²	Collector aperture area
h_conv	10[W/(m^2*K)]	10 W/(m ² ·K)	Convective heat transfer...
rho_vacuum	$P_{Pa} / (R_{air} * T_{vacuum})$	0.39842 kg/m ³	Density of vacuum space...
T_inlet	30[degC]	303.15 K	Inlet water temperature
m_dot	0.0293[kg/s]	0.0293 kg/s	Mass flow rate
P_Pa	101325-P_vacuum	34664 Pa	Pressure in Pascals: Conve...
G	401[W/m^2]	401 W/m ²	Solar radiation intensity
R_air	287 [J/(kg*K)]	287 J/(kg·K)	Specific Gas Constant for...
c_p_vacuum	1005 [J/(kg*K)]	1005 J/(kg·K)	Specific heat capacity of...
cp_water	4180.5[J/(kg*K)]	4180.5 J/(kg·K)	Specific heat capacity of...
T_vacuum	303.15 [K]	303.15 K	Temperature: Assumed a...
k_vacuum	$0.009 + ((0.015 - 0.009)/(500 - 300)) * (500 - 300)$	0.015	Thermal Conductivity bas...
P_vacuum	500 [mmHg]	66661 Pa	Vacuum Pressure: Default...

Gambar 4.21 Parameter Input COMSOL

4.4.3 Aliran Model Turbulen

Berdasarkan Gambar 4.2 hasil pengukuran *mass flow rate* fluida (air) pada pipa berdiameter 1,09 cm didapatkan sebesar 29 ml/s. Data tersebut digunakan untuk menghitung kecepatan fluida. Karakteristik turbulensi dalam aliran fluida ditentukan dengan menghitung angka Reynolds (Re), yang didefinisikan melalui persamaan berikut:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \times 0.010922^2}{4} = 9.371 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$
$$v = \frac{\dot{m}}{\rho_{air} \times A} = \frac{0.0293}{981 \times 9.371 \times 10^{-5}} = 0.3162 \text{ m/s}$$
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$
$$Re = \frac{989.1 \times 0.3162 \times 0.010922}{5.72 \times 10^{-4}} = 5971.45$$

Nilai Reynolds yang dihitung (5971.45) berada di atas batas kritis aliran turbulen ($Re > 4000$), sehingga terbukti bahwa aliran fluida dalam sistem ini bersifat turbulen.



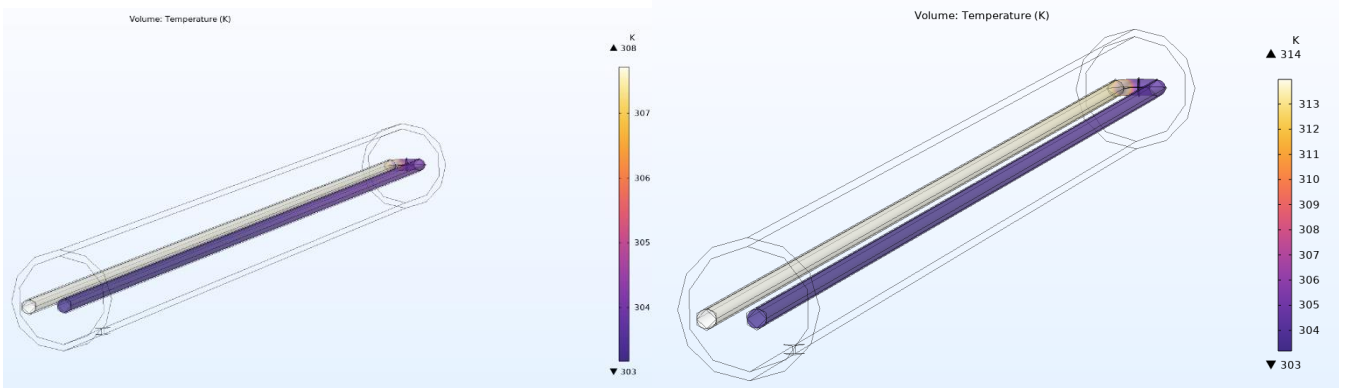
Gambar 4.22 Tampak Atas Domain Aliran Turbulen

Dengan demikian, akan digunakan model turbulensi $k-\epsilon$ pada simulasi numerik. Pendekatan ini memungkinkan representasi realistis tentang bagaimana sifat aliran air memengaruhi distribusi suhu, terutama di sepanjang permukaan dalam pipa tempat terjadinya pengambilan panas secara konvektif. Perubahan kecil dalam laju aliran atau intensitas turbulensi dapat dikorelasikan dengan perubahan gradien termal yang diamati, memberikan wawasan tentang interaksi antara mekanika fluida dan efisiensi perpindahan panas. Dengan menggabungkan interface ini—padatan, fluida, radiasi, dan turbulensi—lingkungan simulasi mereplikasi pertukaran termal yang rumit dalam sebuah rakitan pemanas surya. Setelah semua kondisi batas (*boundary conditions*) ditetapkan dengan cermat pada setiap antarmuka, langkah selanjutnya adalah melakukan pengaturan *meshing*.

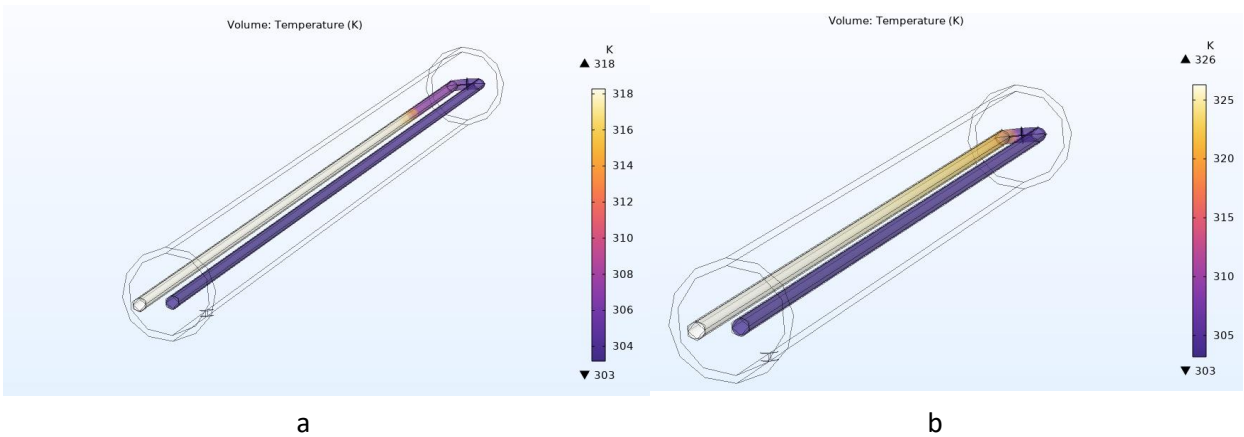
4.4.4 Hasil Simulasi

Hasil simulasi numerik menunjukkan bagaimana tekanan vakum, sifat material, dan aliran fluida bersama-sama memengaruhi kinerja panas sistem. Dengan demikian, analisisnya dimulai dari pemahaman dasar material dan fisika, lalu berkembang hingga gambaran menyeluruh tentang

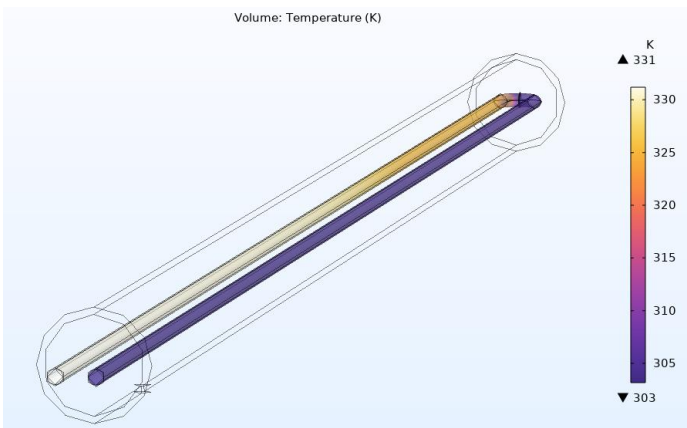
perpindahan panas, yang membantu menemukan cara untuk meningkatkan efisiensi pada kolektor surya berbasis pipa vakum. Berikut merupakan hasil simulasi dari temperatur fluida pada tekanan vakum 500 mmHg dengan meshing "Fine" (Gambar 4.23-4.27):



Gambar 4.23 Plot Temperatur Hasil Simulasi pada Tekanan Vakum 200 (a) dan 300 mmHg (b)



Gambar 4.24 Plot Temperatur Hasil Simulasi pada Tekanan Vakum 400 (a) dan 500 mmHg (b)



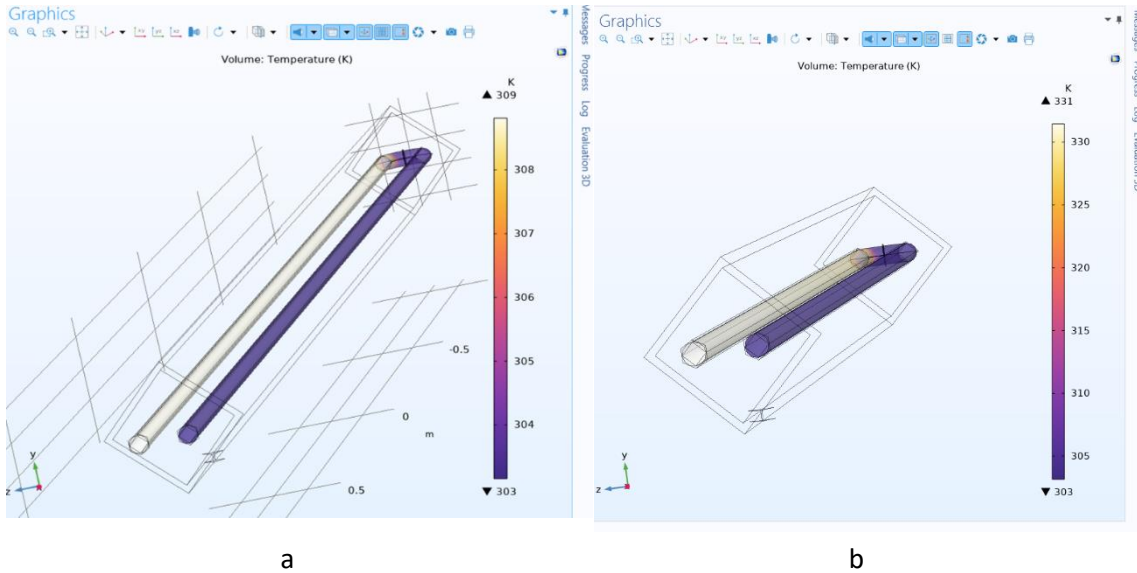
Gambar 4.25 Plot Temperatur Hasil Simulasi pada Tekanan Vakum 600 mmHg

Pada Gambar 4.20 simulasi menunjukkan bahwa suhu keluaran berada di kisaran 308 K. Pada level vakum yang relatif rendah ini, jumlah udara sisa di dalam pipa masih tinggi, sehingga terjadi kehilangan panas yang cukup besar melalui konveksi dan konduksi. Akibatnya, energi surya yang diserap tidak sepenuhnya ditransfer ke fluida, dan suhu keluaran tetap rendah. Karena distribusi suhu pada kondisi ini cukup seragam dengan variasi yang tidak terlalu besar dari 303K hingga 308K.

Ketika kondisi vakum ditingkatkan menjadi 300 mmHg seperti pada Gambar 4.21, jumlah udara di dalam pipa berkurang, sehingga kehilangan panas melalui konveksi mulai berkurang dan lebih banyak energi surya dapat digunakan untuk memanaskan air. Hasilnya, suhu keluaran meningkat menjadi sekitar 314 K. Karena perbedaan suhu yang lebih banyak sehingga warna indikator juga lebih banyak, suhu dari 303K hingga 314K. Pada Gambar 4.22, simulasi dengan tekanan vakum 400 mmHg menunjukkan suhu keluaran sekitar 318 K. Di sini, distribusi suhu mulai menunjukkan perbedaan yang lebih heterogen di beberapa area dalam sistem. Hal ini mengindikasikan adanya variasi suhu yang lebih halus dan perbedaan lokal yang signifikan di beberapa titik—mungkin di sekitar daerah penyerapan panas atau dekat dinding pipa. Oleh sebab itu, perangkat lunak simulasi menampilkan lebih banyak nilai indikator (nilai kontur) yaitu dari 303 K hingga 318 K

Dapat dilihat pada Gambar 4.23 ketika vakum ditingkatkan ke 500 mmHg, kondisi di dalam pipa menunjukkan pengurangan yang signifikan pada kehilangan panas karena hampir minimnya udara yang tersisa. Energi surya yang diserap oleh pipa lebih efektif digunakan untuk memanaskan fluida, sehingga suhu keluaran naik menjadi sekitar 326 K. Kondisi vakum paling optimal yaitu 600 mmHg, hampir seluruh udara telah dieliminasi sehingga konveksi dan konduksi sangat diminimalkan. Dengan demikian, hampir seluruh energi surya yang ditangkap digunakan untuk memanaskan air, menghasilkan suhu keluaran tertinggi sekitar 331 K.

Dari kelima plot simulasi tersebut, terlihat bahwa peningkatan tingkat vakum (dari 200 mmHg ke 600 mmHg) berbanding lurus dengan peningkatan suhu keluaran. Hal ini terjadi karena peningkatan vakum mengurangi jumlah udara yang menyebabkan kehilangan panas melalui konveksi dan konduksi. Selain itu, perbedaan jumlah indikator suhu di tiap plot diatur secara otomatis oleh perangkat lunak simulasi untuk mencerminkan tingkat variasi lokal pada distribusi suhu. Pada tingkat tekanan 200, 500, dan 600 mmHg memiliki variasi suhu yang lebih kecil (seperti) dibandingkan pada tingkat tekanan 300 dan 400 mmHg dengan variasi suhu yang lebih kompleks.



Gambar 4.26 Plot Temperatur Hasil Simulasi pada Tekanan Vakum 300 (a) dan 500 mmHg (b) Menggunakan Mesh “Coarse”

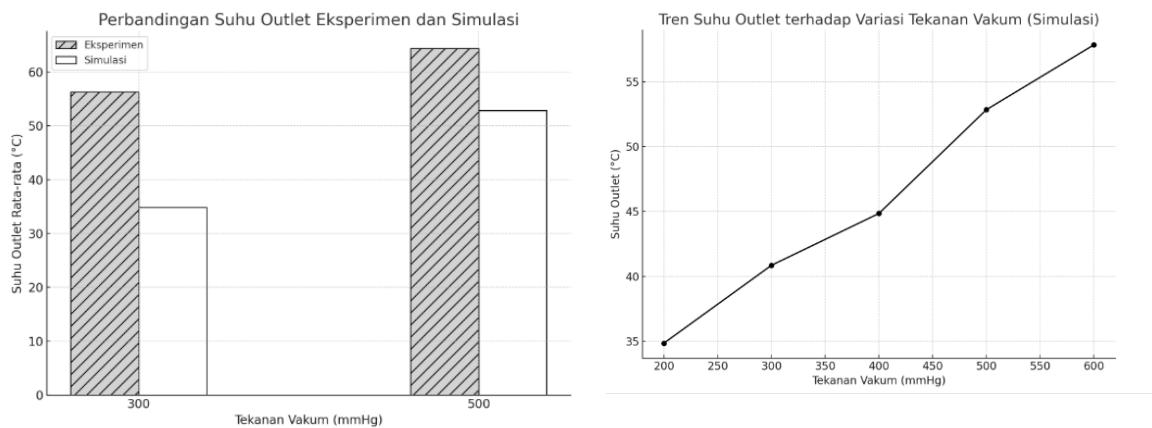
Pada kondisi vakum 300 mmHg, simulasi mesh kasar menghasilkan suhu keluaran sekitar 309 K, sedangkan mesh halus memberikan sekitar 314 K—selisih 5 K yang menunjukkan mesh halus mampu menangkap gradien suhu lokal dengan lebih baik. Pada vakum 500 mmHg, pola serupa terjadi namun berlawanan: mesh kasar menghasilkan suhu keluaran sekitar 331 K, sedangkan mesh halus menurun menjadi 326 K, juga selisih 5 K. Perbedaan 5 K pada kedua kondisi menandakan bahwa meski resolusi mesh memengaruhi detail distribusi suhu, hasil keseluruhan tetap konsisten dan stabil. Selisih ini masih dalam batas variasi wajar relatif terhadap rentang temperatur simulasi, mengindikasikan bahwa model telah mendekati grid independence dan cukup robust untuk merepresentasikan perpindahan panas dalam sistem.

4.4.2 Korelasi Hasil Simulasi dan Eksperimen pada Hari Kedua

Pada perbandingan langsung, hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu keluaran berada di kisaran 326 K (53 °C), sedangkan data eksperimen seperti terlihat pada lampiran 2, pada kondisi 500 mmHg memperlihatkan T_{outlet} yang bervariasi antara 58,6 °C hingga 66,7 °C, tergantung pada jam pengukuran dan intensitas radiasi yang berkisar antara 515 hingga 573 W/m². Dari sini tampak bahwa hasil eksperimen memiliki suhu akhir sedikit lebih tinggi dibanding simulasi. Selisih tersebut masih tergolong wajar, karena pada kondisi nyata di lapangan terdapat faktor tambahan yang dapat meningkatkan penyerapan panas. Selain itu, perbedaan intensitas radiasi turut berperan. Simulasi

menggunakan intensitas konstan sebesar 500 W/m^2 , sementara pada eksperimen intensitas radiasi bervariasi, dengan nilai yang lebih tinggi (terutama pada 544 dan 573 W/m^2) yang dapat menjelaskan mengapa suhu keluaran di lapangan mencapai $58\text{--}66 \text{ }^\circ\text{C}$, sedikit di atas hasil simulasi. Kenaikan intensitas radiasi sekecil $20\text{--}70 \text{ W/m}^2$ saja sudah cukup untuk menaikkan suhu air secara signifikan.

Selain itu, kondisi lapangan seperti sudut matahari, pantulan dari permukaan sekitar, reflektor tambahan, perbedaan flow rate, dan sedikit fluktuasi suhu inlet ($29\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ versus asumsi $30 \text{ }^\circ\text{C}$) turut memperbesar output suhu pada eksperimen. Secara keseluruhan, tren peningkatan suhu keluaran dengan semakin kuatnya vakum konsisten antara simulasi dan eksperimen, menegaskan validitas model simulasi dalam merefleksikan perilaku sistem. Deviasi kecil dalam hasil lapangan dapat dijelaskan oleh intensitas radiasi yang lebih tinggi, pengaruh lingkungan, dan detail desain kolektor yang tidak sepenuhnya dimasukkan dalam model. Dua grafik perbandingan disajikan untuk mengilustrasikan perubahan suhu air keluar saat tekanan vakum divariasikan.



Gambar 4.27 Plot Perbandingan Suhu Outlet Eksperimen dan Simulasi dan Tren Suhu Outlet terhadap Variasi Tekanan Vakum (Simulasi)

Dalam eksperimen, efisiensi pemanasan air diukur pada dua kondisi tekanan vakum, yaitu 300 mmHg dan 500 mmHg . Data menunjukkan bahwa pada 300 mmHg , suhu keluaran air lebih rendah—menunjukkan efisiensi pemanasan air yang lebih rendah (misalnya, berada pada kisaran yang lebih rendah, sekitar $25\text{--}36\%$). Sementara itu, pada 500 mmHg , suhu keluaran meningkat sehingga efisiensi pemanasan air mencapai kisaran $40\text{--}45\%$. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan tingkat vakum secara langsung mengurangi kehilangan panas melalui konveksi, sehingga energi surya yang diserap dapat digunakan secara lebih optimal untuk memanaskan air.

Penelitian Chen et al. (2010) menerapkan vakum ultra-rendah ($\approx 0,01$ torr) dan intensitas radiasi tinggi (~ 800 W/m²), sehingga suhu heat pipe mereka mencapai 99–102 °C dan suhu tangki air naik rata-rata 52,6 °C (kolektor non-glass), sedangkan kolektor kaca komersial menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi. Sementara itu, Adriel (2022) melaporkan efisiensi 38–46% tanpa fokus khusus pada tekanan vakum. Bandingkan dengan eksperimen kita pada 300 mmHg dan 500 mmHg di mana tekanan dan radiasi jauh lebih rendah, sehingga efisiensi absolutnya pun lebih kecil.

Meskipun metodologi, tingkat vakum, dan intensitas radiasi berbeda, ketiga studi sepakat bahwa peningkatan vakum secara signifikan mengurangi kehilangan panas konveksi dan menaikkan efisiensi pemanasan air. Variasi nilai efisiensi absolut dijelaskan oleh perbedaan desain kolektor, material, serta kondisi lingkungan dan operasional saat pengujian. Secara keseluruhan, komparasi ini menegaskan bahwa optimasi tekanan vakum adalah faktor kunci untuk meningkatkan kinerja termal sistem pemanas air tenaga surya.