

BAB V

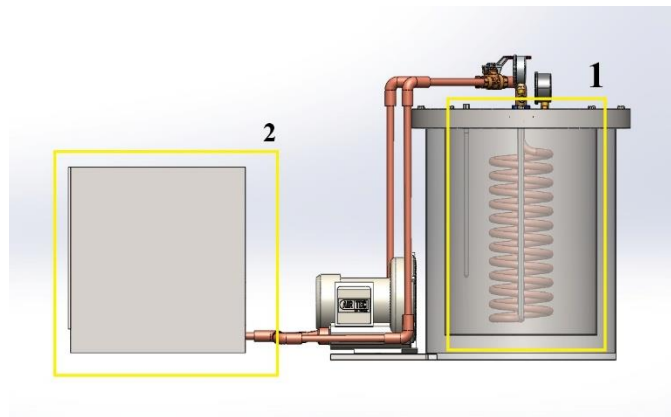
HASIL DAN ANALISIS

5.1 Prosedur dan Metode Pengujian

Pengujian sistem dilakukan secara komprehensif untuk mengevaluasi kinerja purwarupa alat pengering berbasis *Thermal Energy Storage* (TES) guna memastikan bahwa keseluruhan sistem beroperasi sesuai dengan spesifikasi dan fungsionalitas yang dirancang. Untuk menunjang keakuratan pengambilan data dan observasi, pengujian ini menggunakan beberapa instrumen standar dan objek uji dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 5 - 1 Metode Pengujian

Instrumen / Objek Uji	Fungsi dalam Pengujian
Anemometer	Mengukur kecepatan aliran udara (<i>airflow</i>) yang keluar dari <i>coil heat collector</i> .
<i>Thermo Gun</i> (Inframerah)	Memverifikasi pemerataan suhu permukaan radiasi pada pipa tembaga di dalam ruang oven.
Termokopel Eksternal	Mengukur suhu aktual udara panas yang berhasil diekstraksi dari baterai pasir.
Timbangan Digital Presisi	Mengukur penyusutan massa komoditas sebelum, selama, dan sesudah proses pengeringan.
Irisan Jahe Segar	Bertindak sebagai objek uji fungsionalitas komoditas rempah untuk mengukur laju pengeringan.



Gambar 5. 1 Gambaran Sistem

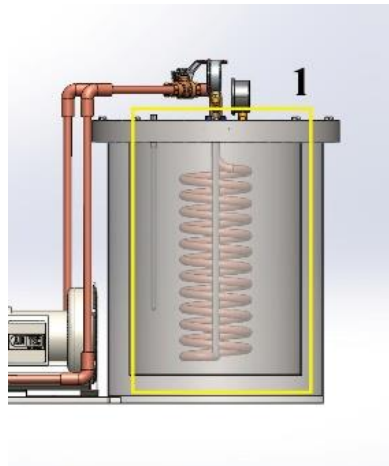
Secara struktural, titik pengujian pada sistem ini dibagi menjadi dua area utama yang divisualisasikan pada Gambar 5.1. Area yang ditandai dengan **Kotak Nomor 1** merupakan tabung baterai pasir yang berisi *coil heat collector* tembaga sebagai sumber ekstraksi panas. Sementara itu, area yang ditandai dengan **Kotak Nomor 2** merupakan ruang pengering (*oven*) tertutup tempat komoditas diletakkan dan dipanaskan.

Proses pengambilan data kinerja alat pada penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan observasi yang dilaksanakan secara berurutan, yaitu:

1. **Pengujian Efektivitas *Coil Heat Collector*** Tahapan ini bertujuan untuk menguji seberapa efisien energi termal dari baterai pasir diserap oleh sirkulasi udara di dalam pipa.
 - a. **Prosedur:** *Blower* dinyalakan untuk mendistribusikan udara paksa ke dalam saluran pipa tembaga siklus tertutup.
 - b. **Parameter yang Diuji:** Kecepatan embusan udara yang keluar dari koil silika diukur menggunakan anemometer, dan suhu udara panas aktual yang keluar dari *heat collector* tersebut diukur menggunakan termokopel eksternal.
2. **Pengujian Distribusi Termal Ruang Pengering (*Oven*)** Tahapan ini difokuskan untuk menguji perilaku suhu di dalam ruang tertutup (*enclosure*) saat disuplai udara panas dari baterai pasir, sekaligus menguji keandalan sistem kontrol.

- a. **Prosedur:** Udara panas dari baterai pasir dibiarkan mengalir secara kontinu memanaskan susunan pipa berliku (radiator) di dalam oven.
- b. **Parameter yang Diuji:**
 - 1) **Waktu Pemanasan (*Heating Rate*):** Durasi yang dibutuhkan sistem untuk menaikkan suhu awal ruang pengering hingga mencapai titik *setpoint* 45°C.
 - 2) **Kestabilan Suhu:** Kemampuan sistem kontrol histeresis dalam mempertahankan suhu ruang di angka 45°C tanpa osilasi berlebih.
 - 3) **Konsumsi Panas (*Heat Draw*):** Penurunan suhu pada media baterai pasir, guna mengetahui jumlah energi termal yang dipakai untuk memanaskan oven.
 - 4) **Pemerataan Radiasi:** Suhu permukaan di berbagai titik pipa radiator dan rak pengering yang diverifikasi menggunakan *thermo gun*.
3. **Pengujian Fungsionalitas Laju Pengeringan (*Drying Rate*)** Tahapan ini adalah pengujian aplikasi nyata sistem untuk melihat kemampuannya dalam mengeringkan komoditas organik.
 - a. **Prosedur:** Irisan jahe segar ditimbang massa awalnya, kemudian dimasukkan ke dalam oven yang suhunya telah dikunci pada *setpoint* 45°C. Total waktu pengeringan dilakukan selama 3 jam.
 - b. **Parameter yang Diuji:** Jahe dikeluarkan sejenak untuk ditimbang massanya secara presisi setiap interval waktu **1 jam**. Data penyusutan massa ini dicatat untuk membentuk kurva laju pengeringan (*drying rate*) dan mengetahui persentase air yang berhasil diuapkan.

5.2 Pengujian Heat Collector



Gambar 5. 2 Baterai Pasir

Pengujian *coil heat collector* bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan desain sirkuit perpipaan tembaga dalam mengekstraksi energi termal dari media baterai pasir dan mengalirkannya menuju ruang pengering. Pada tahapan ini, pengujian dilakukan dengan membandingkan dua versi desain *coil heat collector*. Parameter utama yang diukur meliputi kecepatan aliran udara (*airflow*) menggunakan anemometer dan suhu udara keluaran (*output*) menggunakan sensor termokopel. Selama proses pengujian berlangsung, kecepatan udara dorong (masukan) dari aktuatur *blower* dijaga secara konstan pada nilai 10,6 m/s untuk kedua versi koil tersebut.

Berdasarkan hasil pengujian termal, kedua versi *coil heat collector* terbukti mampu menyerap dan menghantarkan panas dari media pasir silika dengan sangat baik. Hal ini ditunjukkan oleh suhu udara keluaran dari kedua koil yang mampu mencapai angka 70°C. Namun, meskipun suhu yang dihasilkan sama, terdapat perbedaan yang sangat signifikan pada parameter aerodinamika, yaitu kecepatan aliran udara yang berhasil keluar dari sistem perpipaan. Pada pengujian *coil* versi pertama, kecepatan aliran udara pada titik keluaran hanya terukur sebesar 5,1 m/s. Terjadinya penurunan kecepatan yang cukup drastis dari kecepatan awal *blower* (10,6 m/s) ini mengindikasikan adanya hambatan gesek aliran fluida (*friction loss*) dan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang tinggi di dalam lintasan perpipaan versi pertama.

Sebaliknya, pada pengujian *coil* versi kedua, kecepatan aliran udara pada titik keluaran tercatat jauh lebih tinggi, yakni mencapai 8,6 m/s. Hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi jalur aliran pada koil versi kedua berhasil meminimalisasi hambatan struktural dan *pressure drop* di dalam pipa. Meskipun suhu udara keluaran dari kedua versi tersebut sama-sama berada di titik 70°C, kecepatan fluida yang lebih tinggi pada versi kedua memiliki implikasi perpindahan panas yang jauh lebih baik. Laju aliran (debit) udara yang lebih besar pada koil versi kedua berarti massa udara panas yang ditransfer ke dalam ruang oven per satuan waktu menjadi lebih banyak. Berdasarkan analisis tersebut, *coil heat collector* versi kedua dinilai lebih efisien dan optimal untuk diimplementasikan ke dalam sistem alat pengering, karena mampu memberikan laju perpindahan panas konveksi paksa yang lebih maksimal ke ruang oven.

5.3 Pengujian Laju Aliran Udara

Pengujian laju aliran udara bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik dinamika pergerakan dan sirkulasi udara panas yang dihasilkan oleh aktuator *blower* pada dua desain sistem pemanas ruang pengering. Pengukuran ini dilakukan menggunakan instrumen anemometer secara langsung pada jalur distribusi aliran udara.

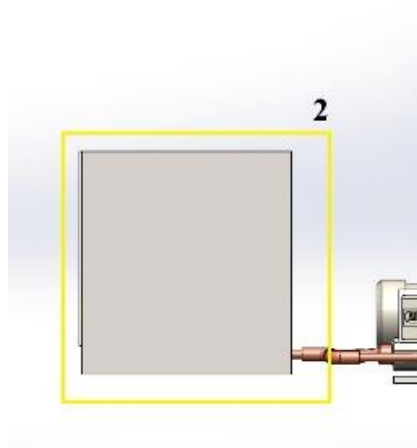
Pada pengujian sistem pemanas **Versi 1 (Sistem Full Closed-Loop)**, sirkulasi udara sepenuhnya tertahan di dalam pipa tembaga berliku yang berfungsi sebagai radiator pemanas. Oleh karena itu, pengukuran laju aliran dilakukan pada sisi ujung keluaran (*output*) pipa tembaga dari dalam oven, tepat sebelum udara tersebut ditarik kembali masuk ke dalam *blower*. Hasil pengukuran menggunakan anemometer menunjukkan kecepatan udara sebesar 4,3 m/s. Nilai kecepatan ini tergolong rendah dikarenakan udara panas harus melewati lintasan pipa tembaga yang panjang dan berliku di dalam oven. Geometri perpipaan radiator tersebut menimbulkan hambatan gesekan aliran (*friction loss*) dan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang cukup signifikan, sehingga dorongan udara dari *blower* banyak tereduksi secara mekanis.

Sebaliknya, pada pengujian sistem pemanas **Versi 2 (Sistem Semi Closed-Loop)**, desain perpipaan dimodifikasi dengan cara memutus jalur pipa di dalam

ruang pengering, sehingga udara panas dari lintasan penyuplai ditembakkan (diinjeksikan) secara langsung ke dalam ruang oven. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa laju semburan udara yang masuk ke dalam oven mencapai 8,6 m/s. Kecepatan ini terukur jauh lebih tinggi karena sirkulasi udara tidak lagi tertahan oleh panjangnya lintasan pipa radiator di dalam oven. Nilai kecepatan 8,6 m/s ini sangat konsisten dan mempertahankan laju dorongan udara dari *coil heat collector* (Versi 2) yang menyuplainya.

Berdasarkan perbandingan kedua data tersebut, sistem pemanas Versi 2 menghasilkan sirkulasi aliran udara yang jauh lebih kuat dibandingkan Versi 1 (8,6 m/s berbanding 4,3 m/s). Dalam konteks proses pengeringan, semburan udara panas dengan kecepatan yang lebih tinggi pada Versi 2 akan menghasilkan efek konveksi paksa (*forced convection*) yang lebih optimal. Hembusan langsung ini tidak hanya mempercepat distribusi pemerataan suhu di dalam ruangan, tetapi secara teori juga akan lebih efektif dalam mengangkat dan membuang uap air dari permukaan komoditas yang dikeringkan (jahe).

5.4 Pengujian Kinerja pada Siang Hari



Gambar 5. 3 Pengering

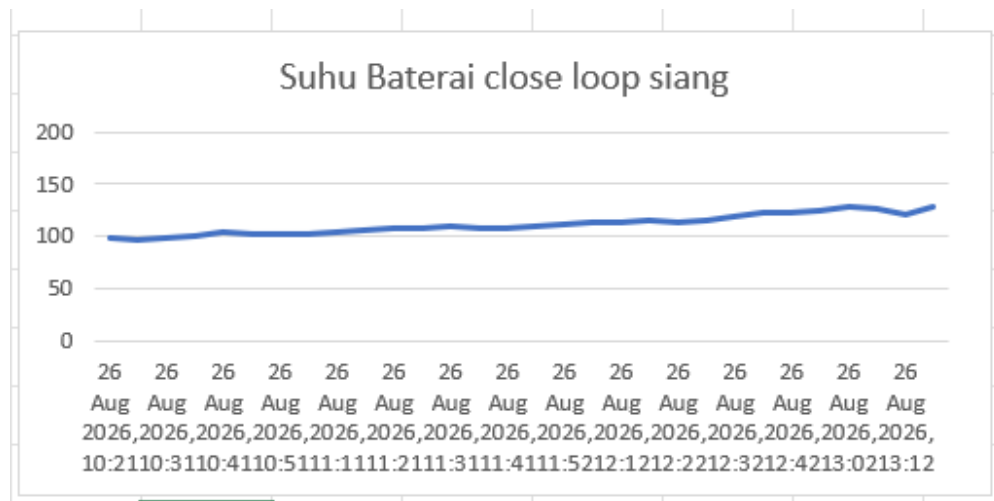
Pengujian kinerja pada siang hari (kondisi *charging*) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memanaskan ruang pengering hingga mencapai target *setpoint* 45°C, sekaligus mengamati kemampuan baterai pasir dalam memulihkan dan menyimpan energi termal dari suplai panel surya secara

bersamaan. Evaluasi pada tahap ini membandingkan performa dua konfigurasi sistem pemanas, yakni Versi 1 (*Full Closed-Loop*) dan Versi 2 (*Semi Closed-Loop*).

5.4.1 Kinerja Baterai pada Siang Hari

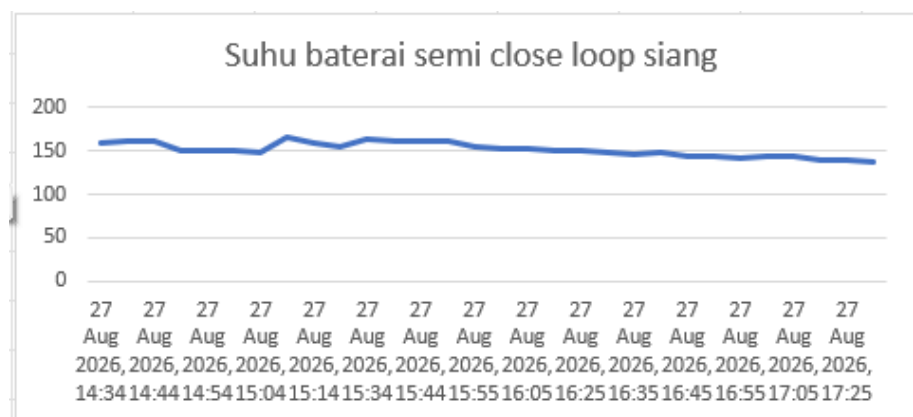
Kinerja baterai pasir (*Thermal Energy Storage*) pada siang hari dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menjaga neraca energi termal, yakni keseimbangan antara laju suplai panas dari elemen pemanas (bersumber dari panel surya) dan laju ekstraksi panas oleh sirkulasi *blower* menuju ruang pengering. Pengujian menunjukkan adanya perbedaan profil keseimbangan energi yang sangat signifikan antara penerapan desain sirkulasi tertutup (*close loop*) dan sirkulasi injeksi langsung (*semi close loop*).

Kemampuan Pengisian Daya Termal (*Charging*) pada Sistem *Close Loop* Pada penerapan pemanas Versi 1 (*close loop*), baterai pasir terbukti mampu melakukan proses *charging* secara optimal meskipun alat pengering sedang dioperasikan pada siang hari. Pengujian yang dilakukan pada tanggal 26 Agustus 2026 menunjukkan tren kenaikan suhu cadangan pasir silika secara konsisten, berawal dari kisaran 100°C hingga menyentuh angka 130°C dalam durasi sekitar tiga jam operasi. Kenaikan kapasitas kalor ini dipengaruhi oleh rendahnya kecepatan aliran udara (4,3 m/s) akibat hambatan aerodinamis dari pipa radiator di dalam oven. Tingginya hambatan ini membatasi jumlah panas yang mampu ditarik secara konveksi oleh udara dari dalam koil tembaga, sehingga laju suplai daya termal dari panel surya jauh lebih besar dibandingkan laju ekstraksi kalornya.

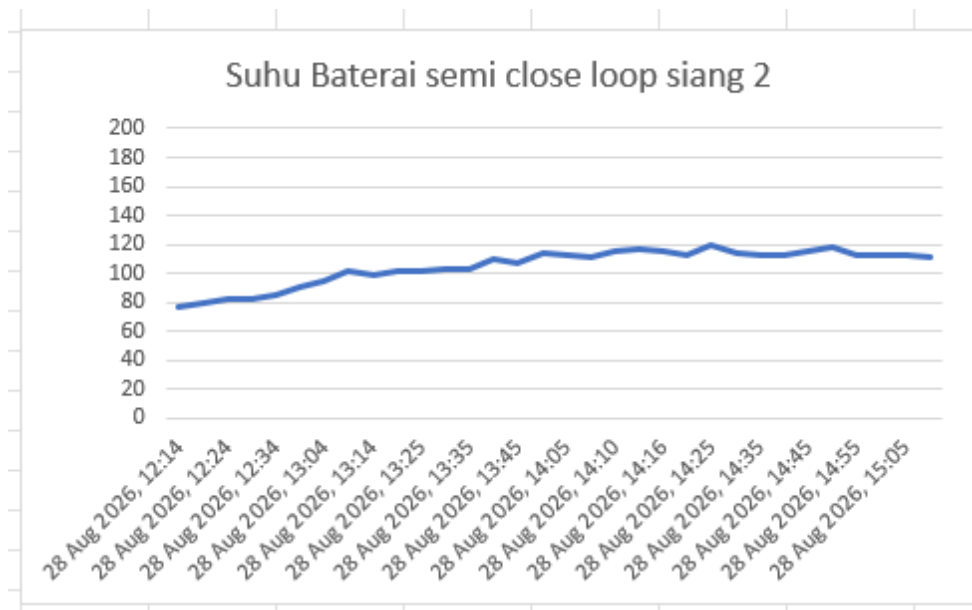


Gambar 5. 4 Suhu Baterai Close Loop siang

Laju Ekstraksi Agresif pada Sistem *Semi Close Loop* Karakteristik neraca energi yang berlawanan terjadi pada pemanas Versi 2 (*semi close loop*). Desain injeksi langsung ini menghasilkan laju sirkulasi udara yang tinggi (8,6 m/s), yang berimplikasi pada masifnya penarikan energi laten dari matriks pasir silika. Pada pengujian tanggal 27 Agustus 2026, kondisi baterai yang awalnya berada di suhu puncak sekitar 160°C justru mengalami tren penurunan tajam hingga menyentuh kisaran 140°C pada akhir pengujian. Kurva penurunan (*discharging*) di tengah pengoperasian siang hari ini membuktikan bahwa laju konsumsi energi oleh sistem *semi close loop* sangat agresif, melampaui batas kemampuan elemen pemanas untuk mengimbangi kehilangan energi tersebut.



Gambar 5. 5 Suhu Baterai Semi Close Loop Siang



Gambar 5. 6 Suhu Baterai Semi Close Loop Siang 2

Dampak Intensitas Iradiasi Surya Maksimal Meski desain *semi close loop* sangat boros dalam mengonsumsi cadangan energi, laju pengurusan baterai sangat bergantung pada paparan intensitas matahari dan posisi suhu awal media penyimpan panas. Pada pengujian lanjutan (28 Agustus 2026) yang dilaksanakan bertepatan dengan titik puncak iradiasi matahari tengah hari, baterai pasir memulai operasi dari kapasitas suhu yang lebih rendah, yakni di kisaran 80°C. Pada kondisi spesifik ini, kombinasi antara suplai daya maksimal dari panel surya 1080 Wp dan delta temperatur yang belum terlalu ekstrem memungkinkan elemen pemanas mengungguli laju ekstraksi *blower*. Hasilnya, kurva kapasitas termal pasir kembali menunjukkan tren kenaikan positif menuju rentang 110°C hingga 120°C.

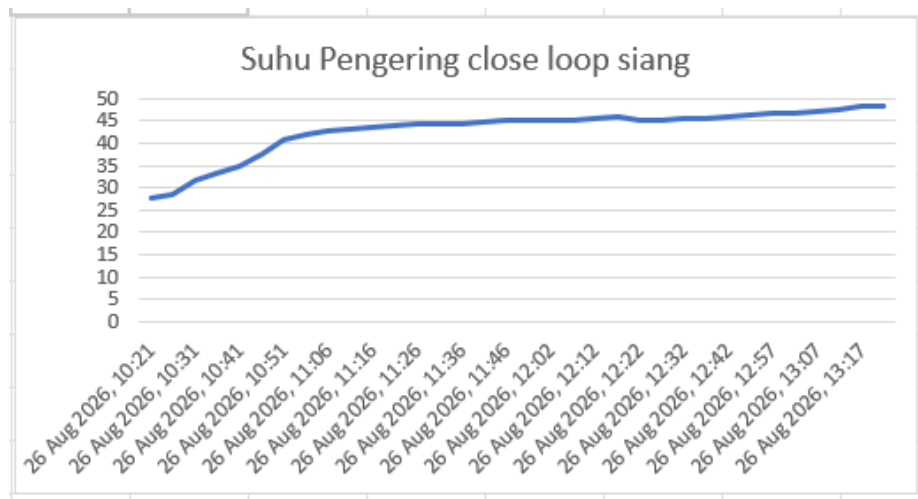
Analisis ini menyimpulkan bahwa terdapat efek timbal balik (*trade-off*) pada modifikasi aliran udara; semakin cepat aliran udara mempercepat pencapaian suhu *setpoint* di ruang pengering, semakin besar pula beban pelepasan energi yang harus ditanggung oleh media penyimpan panas baterai pasir.

5.4.2 Kinerja Pengering pada Siang Hari

Kinerja termal di dalam ruang pengering pada siang hari dievaluasi untuk melihat tingkat percepatan pemanasan (*heating rate*) dan seberapa responsif sistem kendali dalam mempertahankan suhu target di angka 45°C. Karakteristik

perpindahan panas pada ruang pengering menunjukkan perbedaan yang sangat jelas antara penggunaan sistem sirkulasi tertutup (*close loop*) dan sirkulasi injeksi langsung (*semi close loop*).

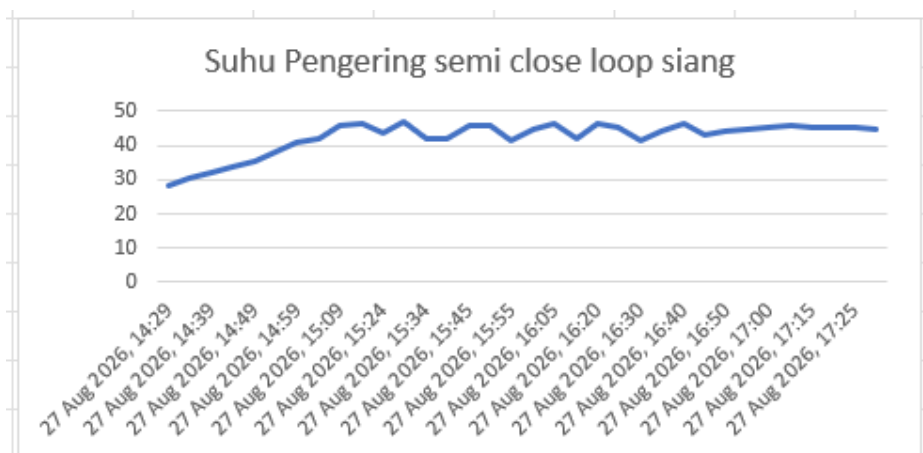
Efek Inersia Termal pada Sistem *Close Loop* Pada pengujian sistem *close loop* di siang hari, proses pemanasan ruang oven berlangsung secara perlahan namun sangat stabil. Berawal dari suhu lingkungan sekitar 28°C, ruang pengering membutuhkan waktu sekitar 30 menit untuk merangkak naik menuju angka 40°C. Kurva pemanasan terlihat terus mendaki dengan mulus tanpa adanya fluktuasi yang tajam hingga mencapai kisaran 48°C pada akhir periode. Profil kurva yang landai dan ketiadaan pola osilasi (gigi gergaji) ini membuktikan tingginya efek inersia termal pada instalasi pipa tembaga radiator di dalam oven. Material tembaga cenderung mengikat panas dan terus meradiasikannya secara perlahan ke dalam ruangan, sehingga putusnya aliran udara akibat matinya *blower* (perintah OFF dari mikrokontroler) tidak memberikan dampak penurunan suhu secara instan di dalam ruang pengering.



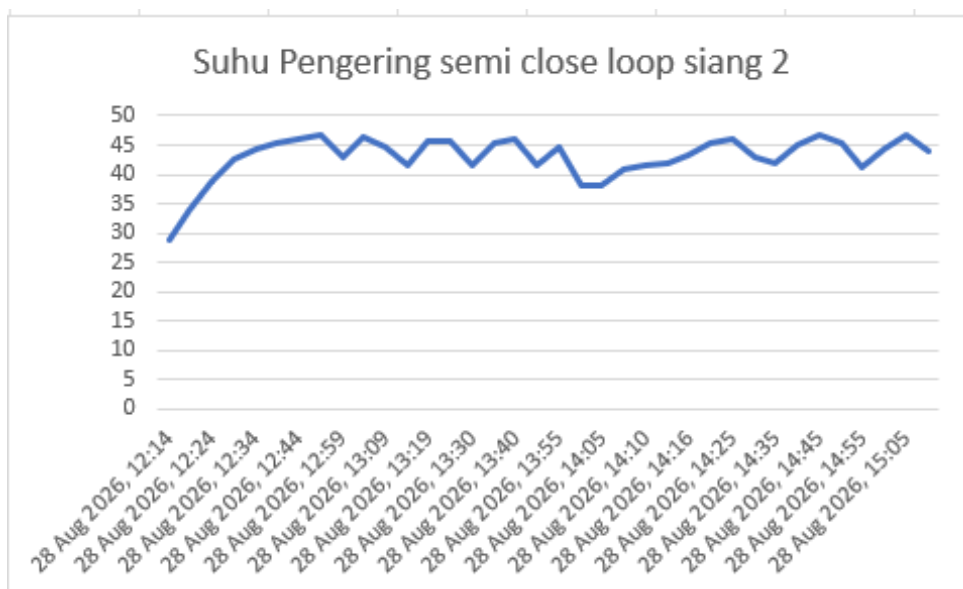
Gambar 5. 7 Suhu Pengering Close Loop Siang

Responsivitas Kontrol Histeresis pada Sistem *Semi Close Loop* Berbeda dengan sistem radiator tertutup, pemanas injeksi udara (*semi close loop*) menampilkan laju perpindahan panas konveksi yang jauh lebih masif dan reaktif terhadap sistem kendali. Pada pengujian siang hari pertama, sistem mampu mendongkrak suhu ruangan dari 28°C menuju *setpoint* 45°C hanya dalam waktu

sekitar 40 menit. Keberhasilan eksekusi algoritma histeresis terbukti dengan jelas melalui terbentuknya pola osilasi yang konsisten (naik-turun) pada rentang suhu 42°C hingga 46°C. Injeksi udara secara langsung merespons perintah ON/OFF dari aktuatur tanpa adanya perlambatan (*delay*) akibat inersia bahan.



Gambar 5. 8 Suhu Pengering Semi Close Loop Siang



Gambar 5. 9 Suhu Pengering Semi Close Loop Siang

Kinerja reaktif ini semakin tervalidasi pada pengujian siang hari kedua yang dilaksanakan pada titik puncak iradiasi matahari. Kenaikan suhu berlangsung sangat tajam, di mana alat mampu menembus *setpoint* 45°C hanya dalam waktu singkat sekitar 20 menit beroperasi. Keunggulan utama dari tingginya laju konveksi paksa ini (8,6 m/s) adalah kemampuan pemulihan (*thermal recovery*) yang sangat

prima. Hal ini terekam secara empiris ketika terjadi anomali penurunan suhu mendadak hingga menyentuh 38°C di pertengahan proses pengeringan. Aliran udara panas yang masif dari baterai pasir terbukti mampu mendongkrak kembali suhu ruangan ke area *setpoint* 45°C dalam hitungan menit.

5.5 Pengujian Kinerja pada Malam Hari

Pengujian kinerja sistem pada kondisi malam hari dilakukan sebagai uji batas kemampuan (*limit test*) dari rancang bangun alat pengering. Pada fase ini, iradiasi matahari tidak tersedia sehingga suplai daya dari panel surya menuju elemen pemanas terhenti sepenuhnya. Oleh karena itu, kelangsungan operasional sistem bergantung 100% pada sisa cadangan panas sensibel yang masih terperangkap di dalam matriks pasir silika (*Thermal Energy Storage*).

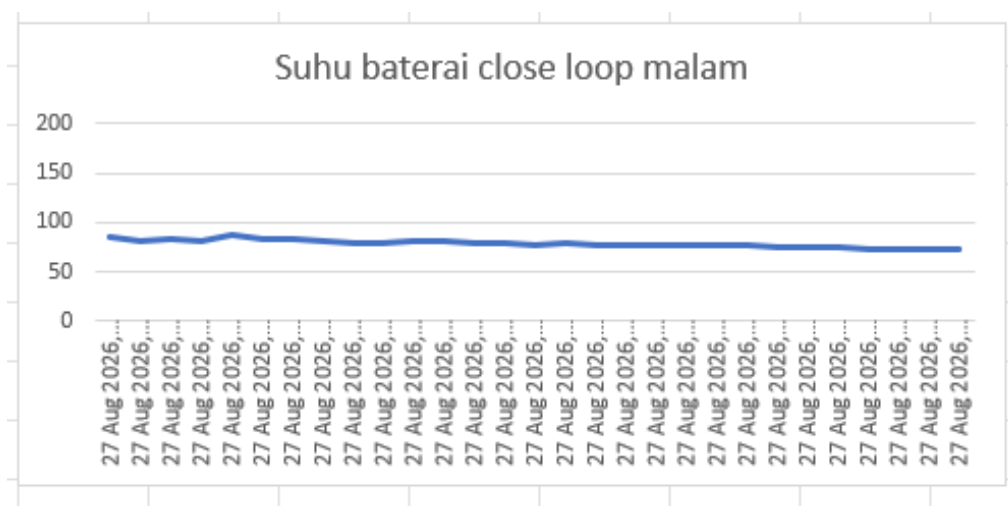
Evaluasi pada tahap pelepasan energi (*discharging*) ini bertujuan untuk menganalisis seberapa lama baterai pasir mampu menyuplai sisa kalornya, serta mengamati batas maksimal kemampuan ruang pengering dalam mengejar *setpoint* 45°C. Sama seperti pengujian siang hari, analisis pada malam hari ini juga membandingkan performa antara sistem pemanas sirkulasi tertutup (Versi 1) dan sistem injeksi udara langsung (Versi 2), yang secara lebih rinci dibedah melalui dua parameter utama: dinamika kapasitas baterai pasir dan tingkat pencapaian suhu di dalam ruang pengering.

5.5.1 Kinerja Baterai pada Malam Hari

Pengujian pada malam hari merepresentasikan kondisi pelepasan energi (*discharging*) murni, di mana suplai daya listrik dari panel surya menuju elemen pemanas telah terhenti secara total. Pada fase kritis ini, kelangsungan proses pemanasan ruang pengering bergantung sepenuhnya pada sisa cadangan kalor sensibel yang masih tersimpan di dalam matriks pasir silika (*Thermal Energy Storage*).

Karakteristik Penurunan Suhu pada Sistem *Close Loop* Berdasarkan grafik pengujian sistem *close loop* pada malam hari, kurva suhu baterai pasir memperlihatkan tren penurunan yang konstan dan perlahan. Kapasitas termal baterai pada awal pengujian terpantau berada di kisaran 80°C hingga 85°C, yang kemudian secara bertahap terkuras akibat proses sirkulasi hingga menyentuh angka

sekitar 70°C pada akhir periode pengujian. Laju penurunan yang tidak terlalu curam ini membuktikan bahwa hambatan aerodinamis pada pipa radiator membatasi penarikan energi secara masif, sehingga sisa panas di dalam pasir terlepas secara perlahan.

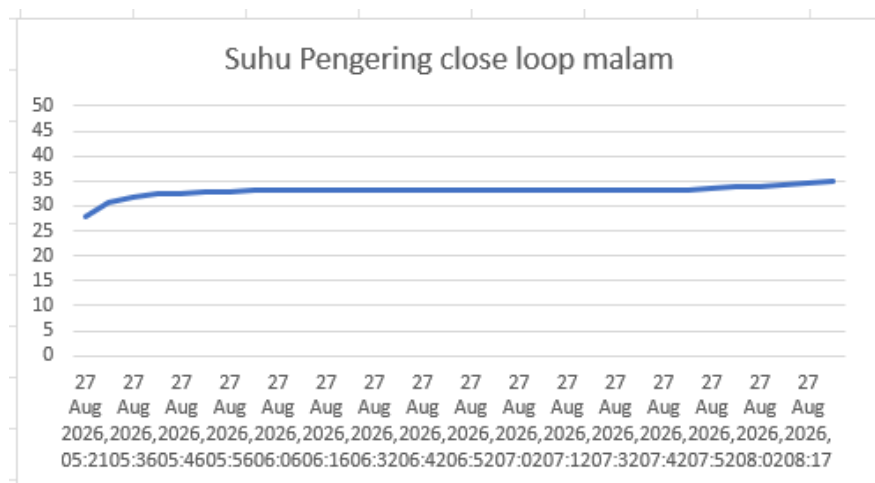


Gambar 5. 10 Suhu Baterai Close Loop Malam

Laju Ekstraksi pada Sistem *Semi Close Loop* Kondisi pengurasan daya termal yang serupa juga terekam pada kedua grafik pengujian *semi close loop* di malam hari. Pada grafik pengujian pertama, cadangan energi termal pasir menurun secara konsisten dari kisaran awal 75°C menjadi sekitar 60°C hingga 65°C seiring berjalannya waktu operasional aktuator. Pola yang identik tervalidasi pada pengujian malam kedua, di mana suhu baterai kembali mengalami tren penurunan (*discharging*) dari titik awal sekitar 85°C menuju kisaran 75°C. Meskipun *blower* pada sistem *semi close loop* beroperasi dengan laju aliran tinggi (8,6 m/s), kurva penurunannya tidak securam saat siang hari. Hal ini disebabkan oleh mengecilnya selisih batas suhu (ΔT) antara sisa panas di pasir dengan suhu udara lingkungan. Dampak Kapasitas Awal terhadap Kinerja Malam Hari Fakta empiris paling krusial yang dapat disimpulkan dari ketiga grafik tersebut adalah rendahnya suhu awal baterai pasir saat memulai operasi malam hari. Pada ketiga skenario pengujian, suhu awal penyimpanan panas maksimal hanya berada di kisaran 75°C hingga 85°C. Kapasitas awal yang terlampau rendah—dibandingkan dengan suhu puncak siang hari yang bisa menyentuh 160°C—menjadi faktor utama terbatasnya cadangan

secara mandiri tanpa suplai energi dari panel surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa iradiasi surya, baik konfigurasi sirkulasi tertutup maupun injeksi langsung mengalami kesulitan untuk memanaskan ruangan hingga mencapai *setpoint* 45°C.

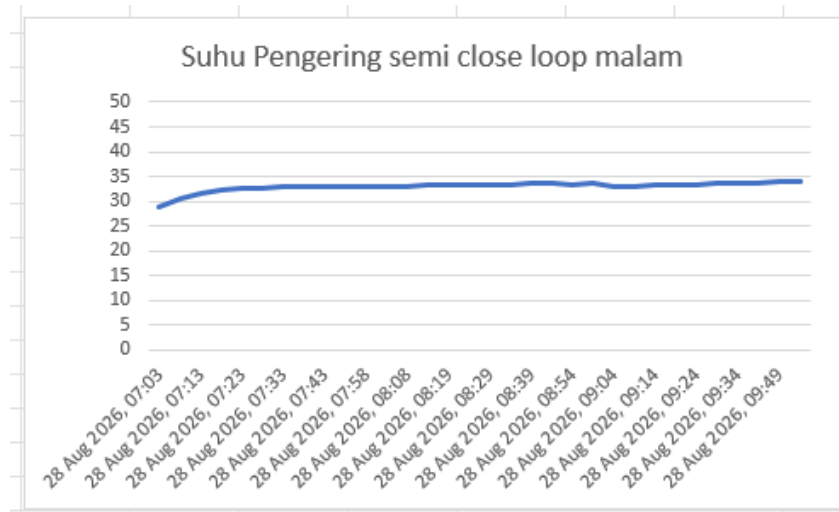
Kinerja Pemanasan Sistem *Close Loop* Berdasarkan grafik pengujian *close loop* pada malam hari, suhu di dalam ruang pengering beranjak dari titik awal sekitar 28°C. Seiring beroperasinya *blower*, suhu ruangan mengalami kenaikan yang sangat lambat dan akhirnya mengalami stagnasi. Kurva memanjang secara mendatar (*flat*) di kisaran 33°C hingga 35°C dari awal hingga akhir periode pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor radiasi dari pipa tembaga tidak cukup kuat untuk mendongkrak suhu ruangan ke target 45°C.



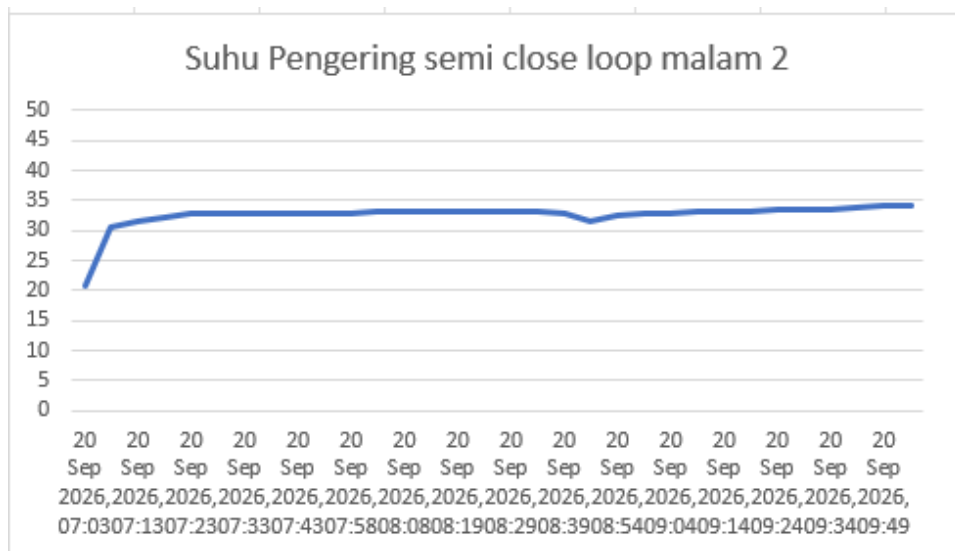
Gambar 5. 13 Suhu Pengering

Stagnasi Suhu pada Sistem *Semi Close Loop* Ketidakmampuan mencapai *setpoint* juga terjadi pada sistem injeksi langsung (*semi close loop*), meskipun desain ini memiliki kecepatan aliran udara yang lebih tinggi (8,6 m/s). Pada grafik pengujian malam pertama, suhu ruangan kembali menunjukkan pola stagnasi yang identik, yakni tertahan di kisaran 33°C hingga 34°C sepanjang waktu operasional. Karakteristik serupa tervalidasi pada pengujian malam kedua; meskipun suhu awal terdeteksi sangat rendah di kisaran 20°C dan berhasil naik dengan cepat, kurva kembali mendatar dan gagal menembus angka 34°C. Besarnya laju aliran udara

pada aktuator ternyata tidak memberikan dampak signifikan apabila sumber panas (*heat source*) utamanya tidak mencukupi.



Gambar 5. 14 Suhu Pengering



Gambar 5. 15 Suhu Pengering

Analisis Keseimbangan Termal (*Thermal Equilibrium*)

Kegagalan kedua versi pemanas untuk mencapai *setpoint* 45°C pada malam hari disebabkan oleh terjadinya keseimbangan termal prematur. Seperti yang telah dianalisis pada sub-bab kinerja baterai malam hari, kapasitas suhu awal pasir silika terlampaui rendah (hanya 75°C - 85°C). Akibatnya, besaran energi termal yang berhasil dipindahkan ke dalam oven menjadi sangat terbatas. Pada titik suhu 33°C

- 35°C, laju energi panas yang disuplai oleh sirkulasi udara dari baterai pasir telah seimbang (sama besar) dengan laju kehilangan panas (*heat loss*) yang merambat keluar melalui dinding kabinet oven ke udara malam yang dingin. Sistem mencapai ekuilibrium yang membuat kurva suhu menjadi stagnan jauh di bawah *setpoint* pengeringan ideal.

5.6 Analisis Efisiensi Energi Termal dan Kelistrikan Aktuator

Analisis pada tahap akhir ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja rancang bangun alat pengering secara komprehensif melalui tinjauan neraca energi (*energy balance*) dan efisiensi pemanfaatan daya. Evaluasi dilakukan dengan melacak jejak aliran energi dari hulu ke hilir, yakni membandingkan total energi panas yang berhasil diekstraksi dari media penyimpanan (baterai pasir) terhadap total energi yang secara faktual dimanfaatkan di dalam ruang pengering untuk menguapkan massa air pada komoditas.

Selain tinjauan murni termodinamika, analisis ini juga mengevaluasi efektivitas elektromekanik dari aktuator sirkulasi utama (*blower*). Evaluasi kelistrikan ini membandingkan besaran daya listrik yang dikonsumsi oleh motor aktuator terhadap besaran laju daya termal aktual yang berhasil didistribusikan ke dalam kabinet oven. Penjabaran matematis mengenai ekstraksi energi, beban pengeringan, efisiensi termal, hingga perbandingan daya kelistrikan tersebut akan diuraikan secara lebih rinci pada sub-bab berikut.

5.6.1 Energi Termal yang Diekstraksi dari Baterai Pasir (Q_{baterai})

Perhitungan total energi panas yang berhasil diserap dan didistribusikan dari baterai pasir menuju ruang pengering ($Q_{\text{ekstraksi}}$) tidak dapat disamaratakan untuk semua kondisi pengujian. Terdapat perbedaan persamaan termodinamika yang mendasar antara operasional malam hari (tanpa iradiasi surya) dan siang hari (dengan iradiasi surya). Oleh karena itu, evaluasi neraca energi pada baterai pasir dibagi menjadi dua pendekatan analitik sebagai berikut:

A. Ekstraksi Energi pada Malam Hari (Kondisi *Discharging* Murni)

Pada pengujian malam hari, suplai daya listrik dari panel surya menuju elemen pemanas terhenti sepenuhnya, sehingga tidak ada penambahan energi baru ke dalam sistem ($Q_{\text{input}} = 0$). Ekstraksi panas ke ruang oven murni berasal dari

pelepasan cadangan kalor sensibel yang tersimpan di dalam 57 kg media pasir silika.

Besarnya energi yang berhasil diekstraksi selama durasi pengujian dapat dikalkulasikan secara langsung menggunakan selisih suhu awal dan akhir baterai pasir:

$$Q_{ekstraksi} = M_{pasir} \cdot C_{pasir} \cdot (T_{awal} - T_{akhir})$$

(Keterangan: M_{pasir} adalah massa pasir silika sebesar 57 kg; C_{pasir} adalah kalor jenis pasir silika $\approx 830 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; T_{awal} dan T_{akhir} adalah suhu baterai pasir saat awal dan akhir pengujian malam hari).

Percobaan	Qekstraksi	Mpasir	Cpasir	Delta T
Close Loop Malam	585461,25 J	57 Kg	830 J/Kg°C	12,375 °C
Semi Close Loop Malam	449445 J	57 Kg	831 J/Kg°C	9,5 °C
Semi Close Loop Malam 2	541226,4 J	57 Kg	832 J/Kg°C	11,44 °C

B. Ekstraksi Energi pada Siang Hari

Pada pengujian siang hari, sistem mengalami fenomena termodinamika yang lebih kompleks. Baterai pasir menerima suplai panas dari elemen pemanas yang ditenagai oleh panel surya, namun di saat yang bersamaan, *blower* juga menyedot panas tersebut untuk dialirkan ke dalam oven. Karena fokus perhitungan hanya pada kemampuan baterai untuk mengeluarkan energi panas yang di simpan, maka perhitungan ekstraksi hanya di lakukan pada kondisi suhu baterai turun (kondisi *charging* tidak mampu mengimbangi *discharging*) karena pada kondisi suhu baterai naik energi termal yang disalurkan ke pengering merupakan murni energi dari pemanas pada baterai (bersumber dari panel surya)

1. **Perubahan Energi Internal Pasir (ΔQ_{pasir}):** Merupakan representasi apakah baterai pasir menabung energi atau justru tekor selama beroperasi. Perhitungan yang menghasilkan angka negatif merupakan kondisi baterai menyimpan energi termal selagi pengering beroperasi.

$$\Delta Q_{pasir} = M_{pasir} \cdot C_{pasir} \cdot (T_{akhir} - T_{awal})$$

Tabel 5 - 2 Perubahan Energi Internal Pasir

Percobaan	Qekstraksi	Mpasir	Cpasir	Delta T
Close Loop Siang	-1413386,25 J	57 Kg	830 J/Kg°C	-29,875 °C
Semi Close Loop Siang	1023078,75 J	57 Kg	830 J/Kg°C	21,625 °C
Semi Close Loop Siang 2	-1685655,3 J	57 Kg	830 J/Kg°C	-35,63 °C

5.6.2 Pemanfaatan Energi Termal pada Ruang Pengering (Qpengering)

Energi panas yang berhasil diekstraksi dari baterai pasir selanjutnya didistribusikan ke dalam kabinet oven. Di dalam ruang pengering ini, energi termal tersebut dimanfaatkan (terserap) untuk melakukan dua proses fisika utama: menaikkan suhu udara di dalam ruangan hingga mencapai *setpoint* 45°C (Kalor Sensibel) dan menguapkan kandungan air yang terikat di dalam matriks komoditas jahe (Kalor Laten).

Berdasarkan prinsip kesetimbangan termal pada beban pengeringan, total energi yang secara faktual dimanfaatkan di dalam oven dirumuskan melalui persamaan berikut:

$$Q_{pengering} = Q_{sensibel_udara} + Q_{laten_jahe}$$

$$Q_{pengering} = (M_{udara} \cdot C_{udara} \cdot \Delta T_{udara}) + (\Delta M_{jahe} \cdot L)$$

Keterangan Variabel:

1. M_{udara} : Massa udara di dalam kabinet oven (kg), diperoleh dari perkalian antara volume ruang oven (m³) dengan massa jenis udara ($\rho_{udara} \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$).
2. C_{udara} : Kalor jenis udara pada tekanan konstan ($\approx 1.005 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$).
3. ΔT_{udara} : Selisih kenaikan suhu udara di dalam oven dari suhu lingkungan awal menuju suhu target (misalnya dari 28°C ke 45°C).

4. ΔM_{jahe} : Total massa air yang berhasil diuapkan dari komoditas jahe selama proses pengujian (kg), didapatkan dari selisih penimbangan massa awal dan massa akhir jahe.
5. L : Kalor laten penguapan air ($\approx 2.260.000$ J/kg), yakni besaran energi masif yang dibutuhkan untuk mengubah fasa air menjadi uap.

Sebagai representasi perhitungan pemanfaatan energi beban pengeringan, data empiris dari pengujian **Versi 1 (Siang Hari)** digunakan sebagai acuan baku. Pada pengujian tersebut, total massa awal irisan jahe segar adalah 302,2 gram (0,3022 kg). Setelah proses pengeringan selama 3 jam, massa akhir menyusut menjadi 168,4 gram (0,1684 kg). Tingkat penyusutan ini membuktikan bahwa massa air yang berhasil diuapkan (ΔM_{jahe}) adalah sebesar **0,1338 kg**.

Kebutuhan energi murni untuk memecah ikatan molekul air sebanyak 0,1338 kg tersebut (Kalor Laten) adalah:

Kebutuhan energi murni untuk memecah ikatan molekul air sebanyak 0,1338 kg tersebut direpresentasikan sebagai energi kalor laten. Nilai energi ini didapatkan dengan mengalikan massa air yang berhasil diuapkan dengan nilai ketetapan kalor laten penguapan air, yakni sebesar 2.260.000 Joule/kg. Dari hasil perhitungan tersebut, diperoleh fakta bahwa total energi kalor laten yang terserap khusus untuk menguapkan air pada irisan jahe mencapai 302.388 Joule, atau setara dengan 302,388 kJ. Dari hasil kalkulasi tersebut, terlihat sangat jelas bahwa serapan energi terbesar di dalam ruang pengering didominasi oleh kebutuhan kalor laten. Energi sensibel untuk memanaskan udara ($M_{udara} \cdot C_{udara} \cdot \Delta T_{udara}$) nilainya jauh lebih kecil karena massa udara di dalam kabinet oven sangat ringan (kurang dari 1 kg). Penggabungan dari kalor laten penguapan jahe dan kalor sensibel udara ini merepresentasikan total kerja produktif ($Q_{pengering}$) dari alat pengering, yang nilai akhirnya akan dikomparasikan dengan energi ekstraksi baterai pasir untuk menemukan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Tabel 5 - 3 Energi Pengering

Percobaan	$Q_{pengering}$	M_{udara}	C_{udara}	Delta T	ΔM_{jahe}	L
-----------	-----------------	-------------	-------------	---------	-------------------	---

Close Loop Malam	237374 J	0,0717444 Kg	1005 J/Kg°C	7,3 °C	0,1048 Kg	2260000 J/Kg
Close Loop Siang	303794 J	0,0717444 Kg	1006 J/Kg°C	19,5 °C	0,1338 Kg	2260000 J/Kg
Semi Close Loop Malam	311132 J	0,0717444 Kg	1007 J/Kg°C	5,3 °C	0,1375 Kg	2260000 J/Kg
Semi Close Loop Siang	250956 J	0,0717444 Kg	1008 J/Kg°C	17 °C	0,1105 Kg	2260000 J/Kg
Semi Close Loop Malam 2	253050 J	0,0717444 Kg	1009 J/Kg°C	5,3 °C	0,1118 Kg	2260000 J/Kg
Semi Close Loop Siang 2	286738 J	0,0717444 Kg	1010 J/Kg°C	14,9 °C	0,1264 Kg	2260000 J/Kg

5.6.3 Efisiensi Termal Keseluruhan (η_{termal})

Tahap evaluasi akhir dari analisis termodinamika pada sistem ini adalah menentukan tingkat efisiensi termal keseluruhan. Efisiensi termal merupakan parameter ukur kuantitatif yang menunjukkan seberapa efektif sistem alat pengering dalam mendistribusikan dan memanfaatkan energi panas yang telah diekstraksi dari baterai pasir (*Thermal Energy Storage*).

Nilai efisiensi ini diperoleh dengan membandingkan total energi yang secara faktual berhasil dimanfaatkan sebagai kerja produktif di dalam ruang pengering ($Q_{\text{pengering}}$) terhadap total energi termal yang berhasil diekstraksi dan disalurkan dari baterai pasir ($Q_{\text{ekstraksi}}$). Secara matematis, efisiensi termal keseluruhan dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{termal}} = \left(\frac{Q_{\text{pengering}}}{Q_{\text{ekstraksi}}} \right) \times 100\%$$

Nilai efisiensi termal yang dihasilkan secara empiris tidak akan pernah mencapai angka 100%. Selisih persentase antara energi yang disuplai dan energi yang dimanfaatkan merepresentasikan total rugi-rugi termal (*heat loss*) yang terjadi selama sistem beroperasi. Rugi-rugi energi ini umumnya diakibatkan oleh beberapa faktor fisik pada konstruksi alat, di antaranya Rugi Konduksi dan Konveksi pada Jalur Distribusi panas yang merambat keluar menembus material insulasi

(*rockwool*) pada instalasi pipa tembaga sebelum udara panas mencapai ruang kabinet oven. Rugi Konduksi pada Dinding Pengereng pelepasan kalor menembus dinding kabinet oven akibat adanya perbedaan batas suhu (ΔT) yang signifikan antara suhu di dalam ruang pengering (45°C) dengan suhu udara lingkungan (suhu ruangan). Kebocoran Udara (*Air Leakage*) celah-celah mikroskopis pada pintu oven atau sambungan mekanis yang memungkinkan sebagian sirkulasi udara panas lolos keluar dari sistem tertutup.

Melalui perhitungan efisiensi ini, perbandingan kinerja antara pemanas Versi 1 (*close loop*) dan Versi 2 (*semi close loop*) dapat dievaluasi secara komprehensif. Meskipun sistem injeksi langsung (Versi 2) terbukti mampu mengekstraksi energi dari pasir secara lebih agresif dan memanaskan ruangan dengan cepat, tingkat efisiensinya harus diuji kebenarannya. Apabila nilai efisiensi termal Versi 2 justru lebih rendah dibandingkan Versi 1, hal tersebut mengindikasikan bahwa laju aliran udara yang terlampau tinggi ($8,6 \text{ m/s}$) justru memperbesar persentase energi panas yang terbuang sia-sia ke lingkungan dibandingkan yang terserap oleh irisan jahe.

Tabel 5 - 4 Efisiensi Termal

Percobaan	$Q_{\text{pengering}}$	$Q_{\text{ekstraksi}}$	eff
Close Loop Malam	237374 J	585461,25 J	40,54%
Close Loop Siang	-	-	-
Semi Close Loop Malam	311132 J	449445 J	69,23%
Semi Close Loop Siang	250956 J	1011783,75 J	24,80%
Semi Close Loop Malam 2	253050 J	541226,4 J	46,75%
Semi Close Loop Siang 2	-	-	-

Efisiensi pada sistem sangat berpengaruh dengan suhu pada baterai pasir. Karena sifat kalor yang selalu berpindah dari titik panas menuju titik yang memiliki suhu lebih rendah menyebabkan panas ikut terbuang ke udara bebas pada percobaan semi close loop siang. Pada kasus peningkatan suhu pada baterai pasir saat pengering sedang beroperasi mengindikasikan bahwa alat ini beroperasi dengan

maksimum apabila radiasi dari matahari cukup untuk memberikan energi pada sistem.

5.6.4 Perbandingan Daya Termal Terdistribusi terhadap Konsumsi Energi Listrik Aktuator

Evaluasi kinerja rancang bangun sistem pengering tidak hanya ditinjau dari aspek murni termodinamika, melainkan juga dari aspek efektivitas elektromekanik. Analisis ini bertujuan untuk membandingkan seberapa besar laju daya termal yang berhasil didistribusikan ke dalam ruang pengering terhadap daya listrik aktual yang dikonsumsi oleh motor aktuator (*blower*).

Dalam kaidah konversi energi, total energi panas yang diekstraksi dari baterai pasir ($Q_{ekstraksi}$) dalam satuan Joule, dikonversikan menjadi laju daya termal dalam satuan Watt. Daya termal ini merepresentasikan seberapa cepat sistem memindahkan energi panas setiap detiknya, yang dirumuskan melalui persamaan:

$$P_{termal} = \frac{Q_{ekstraksi}}{t}$$

(Keterangan: P_{termal} adalah laju daya termal terdistribusi dalam Watt; $Q_{ekstraksi}$ adalah total energi dari baterai pasir dalam Joule; dan t adalah total waktu pengujian, yakni 10.800 detik).

Nilai daya termal (P_{termal}) tersebut kemudian dibandingkan secara langsung dengan spesifikasi daya listrik ($P_{listrik}$) dari aktuator *blower* utama. Rasio perbandingan ini (*Coefficient of Performance* / COP) menjadi indikator krusial untuk membuktikan efisiensi kerja mekanik dari sistem Versi 1 (*close loop*) dan Versi 2 (*semi close loop*).

Tabel 5 - 5 Energi Pengering

Percobaan	Blower T_ON (detik)	Blower Joule	Qekstrasi	Rasio
Close Loop Malam	10800	1944000	585461,25	0,301163194
Close Loop Siang	9000	1620000	7165113,555	4,422909602
Semi Close Loop Malam	10800	1944000	449445	0,231195988
Semi Close Loop Siang	8100	1458000	1011783,75	0,693953189
Semi Close Loop Malam 2	10800	1944000	541226,4	0,278408642
Semi Close Loop Siang 2	7200	1296000	8561622,525	6,60619022

Berdasarkan komparasi data pada tabel di atas, terlihat perbedaan karakteristik performa perpindahan panas antara kedua konfigurasi. Pada sistem Versi 1 (*close loop*), adanya hambatan aerodinamis dari dinding pipa tembaga radiator menyebabkan laju sirkulasi udara tertahan di angka 4,3 m/s. Hal ini berdampak pada rendahnya daya termal yang berhasil didistribusikan jika dibandingkan dengan daya listrik yang dikeluarkan oleh motor.

Sebaliknya, pada modifikasi sistem Versi 2 (*semi close loop*), injeksi udara langsung berhasil mendongkrak laju sirkulasi hingga mencapai 8,6 m/s. Kecepatan sirkulasi yang tinggi ini memicu fenomena konveksi paksa (*forced convection*) yang sangat agresif di dalam matriks baterai pasir. Hasilnya, daya termal yang diekstraksi meningkat secara signifikan. Hal ini membuktikan bahwa secara elektromekanik, desain *semi close loop* jauh lebih efektif karena mampu menghasilkan daya transfer kalor yang jauh lebih besar untuk setiap 1 Watt energi listrik yang dikonsumsi.

5.7 Analisis Perbandingan Desain *Heat Collector* dan Sistem Pemanas Pengering

Evaluasi kinerja rancang bangun sistem distribusi panas dilakukan dengan membandingkan dua versi desain pada dua titik krusial, yaitu *coil heat collector* yang berada di dalam baterai pasir dan instalasi pipa pemanas yang berada di dalam ruang pengering. Analisis ini ditujukan untuk menemukan konfigurasi dengan efisiensi perpindahan panas tertinggi serta hambatan aerodinamis terendah.

5.7.1 Analisis Kinerja *Heat Collector* (Versi 1 vs Versi 2)

Perbedaan fundamental antara rancangan *heat collector* Versi 1 dan Versi 2 terletak pada geometri lintasan perpipaan yang secara langsung memengaruhi nilai resistansi udara (*pressure drop*) dan kecepatan aliran (*airflow*).

1. ***Heat Collector* Versi 1:** Desain awal ini menggunakan pipa tembaga berukuran 1/2 inci dengan total panjang mencapai 15 meter yang digulung rapat membentuk kumparan setinggi 48 cm. Secara termodinamika, panjangnya lintasan ini memperluas area kontak penyerapan panas. Namun, secara aerodinamika, lintasan yang terlalu panjang dan berliku tajam menimbulkan

hambatan gesek (*friction loss*) yang sangat tinggi. Akibatnya, dorongan angin dari aktuator *blower* (10,6 m/s) tereduksi secara drastis menjadi hanya 5,1 m/s pada titik keluaran (*output*) koil.

2. **Heat Collector Versi 2:** Desain kedua memodifikasi susunan koil menjadi jalur paralel yang lebih pendek dan menggunakan pipa utama yang lebih besar (3/4 inci) guna menekan rugi tekanan. Modifikasi ini terbukti sangat berhasil secara mekanis, di mana kecepatan aliran udara keluaran meningkat secara signifikan menjadi 8,6 m/s.
3. **Analisis Implikasi:** Berdasarkan hasil pengujian, suhu udara panas maksimal yang berhasil diekstraksi dan dikeluarkan oleh kedua versi koil tersebut bernilai sama, yakni mampu mencapai angka 70°C. Namun, kecepatan fluida yang jauh lebih tinggi pada Versi 2 memberikan implikasi perpindahan kalor konveksi yang jauh lebih superior. Dengan suhu yang sama (70°C), aliran udara 8,6 m/s pada Versi 2 mampu mentransmisikan massa udara panas (laju debit kalor) yang jauh lebih masif per detiknya menuju ruang pengering dibandingkan Versi 1, sehingga proses pemanasan ruang oven menjadi jauh lebih cepat.

5.7.2 Analisis Sistem Pemanas Pengering (Versi 1 vs Versi 2)

Selain pada sisi hulu (baterai pasir), efisiensi sistem juga dievaluasi pada sisi hilir (ruang pengering) melalui perbandingan dua metode pelepasan udara panas, yaitu *Fully Close Loop* dan *Partially/Semi Close Loop*.

1. **Pemanas Versi 1 (*Fully Close Loop*):** Pada sistem ini, aliran udara secara penuh tertahan dan bersirkulasi secara tertutup di dalam jalur pipa tembaga berliku yang berada di dalam oven. Pipa ini bertindak layaknya radiator pasif yang meradiasikan panas secara perlahan.
 - a) *Kelebihan:* Menjaga konservasi energi di dalam baterai pasir karena udara sisa yang kembali ke *heat collector* bersuhu lebih tinggi dari lingkungan.
 - b) *Kelemahan:* Kenaikan suhu ruang oven sangat lambat akibat tingginya inersia termal tembaga dan besarnya hambatan udara di dalam pipa (laju aliran tersisa hanya 4,3 m/s).

2. **Pemanas Versi 2 (*Semi Close Loop*):** Pada sistem ini, ujung pipa tembaga diputus di dalam oven sehingga udara panas dari baterai pasir diinjeksikan secara langsung (*direct injection*) ke dalam ruang pengering. Udara dingin dari dalam oven kemudian dihisap kembali oleh *blower* untuk dipanaskan ulang.

- a) *Kelebihan:* Menghasilkan kecepatan semburan udara yang sangat tinggi (8,6 m/s) langsung ke bahan, menciptakan fenomena konveksi paksa (*forced convection*) yang mendongkrak suhu oven menuju 45°C dengan sangat cepat.
- b) *Kelemahan:* Pengurasan energi di dalam baterai pasir terjadi jauh lebih agresif dan cepat turun karena laju penarikan panas yang masif.

3. Tabel Ringkasan Perbandingan Karakteristik

Untuk memperjelas disparitas kinerja antara kedua rancangan, berikut adalah perbandingan parameter operasionalnya:

Tabel 5 - 6 Perbandingan Karakteristik Performa

Parameter Evaluasi	Versi 1 (Coil Panjang & Fully Close Loop)	Versi 2 (Coil Pendek & Semi Close Loop)
Resistansi Udara (Pipa)	Sangat Tinggi (banyak lekukan & lintasan panjang)	Rendah (jalur lebih pendek & diameter diperbesar)
Kecepatan Aliran Udara	Lemah (Tereduksi hingga 4,3 - 5,1 m/s)	Sangat Kuat (Dipertahankan di 8,6 m/s)
Suhu Keluaran Baterai	~ 70°C (Laju pemindahan debit termal rendah)	~ 70°C (Laju pemindahan debit termal masif)
Mekanisme Pemanasan Oven	Radiasi pasif dari dinding luar pipa tembaga	Konveksi paksa via injeksi udara panas langsung

Kecepatan Pencapaian Suhu (45°C)	Sangat lambat dan cenderung stagnan di bawah target	Sangat cepat (memiliki kurva pemanasan yang curam)
Dampak pada Baterai Pasir	Menghemat kapasitas panas (<i>discharging</i> lambat)	Menguras kapasitas panas dengan agresif (<i>discharging</i> cepat)