

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur dan Metode Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja *sand battery* dalam meningkatkan dan mempertahankan temperatur pasir silika. Pengujian dilaksanakan dalam tiga periode dengan jumlah panel surya, elemen pemanas, dan susunan isolasi termal yang berbeda.

Pengujian pertama dilaksanakan pada 6 sampai 8 Juli 2026. Konfigurasi ini menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas. Bagian penutup tabung menggunakan gasket dan rockwool untuk mengurangi celah serta kehilangan panas. Pengujian ini digunakan sebagai tahap awal untuk mengetahui karakteristik pemanasan dan pendinginan pasir silika.

Pengujian kedua dilaksanakan pada 15 sampai 18 Juli 2026. Konfigurasi ini menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Isolasi termal menggunakan rockwool dan aluminium foil pada bagian sisi tabung. Namun, aluminium foil dan rockwool belum dipasang pada bagian penutup luar tabung. Penambahan panel surya dan elemen pemanas bertujuan meningkatkan daya pemanasan, sedangkan penambahan aluminium foil bertujuan mengurangi kehilangan panas dari sisi tabung.

Pengujian ketiga dilaksanakan pada 31 Juli sampai 3 Agustus 2026. Konfigurasi ini menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Rockwool dan aluminium foil dipasang pada seluruh sisi tabung, termasuk bagian penutup. Konfigurasi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh pemasangan isolasi secara menyeluruh terhadap kenaikan temperatur dan kemampuan pasir dalam mempertahankan panas.

Sebelum pengujian dimulai, peneliti memeriksa posisi elemen pemanas, thermocouple, pasir silika, material isolasi, dan sambungan kelistrikan. Sistem monitoring kemudian diaktifkan untuk memastikan seluruh sensor dapat membaca dan mencatat data dengan baik. Temperatur awal pasir silika dicatat sebelum panel surya dihubungkan dengan elemen pemanas.

Selama proses pemanasan, sistem mencatat Suhu 1, Suhu 2, temperatur rata-rata, serta parameter kelistrikan yang tersedia pada setiap periode pengujian. Pada pengujian 31 Juli sampai 3 Agustus 2026, sistem juga mencatat radiasi matahari untuk mengamati hubungannya dengan keluaran panel surya dan perubahan temperatur pasir.

Setelah daya elemen pemanas menurun hingga mendekati nol, pencatatan temperatur tetap dilanjutkan. Tahap ini bertujuan mengamati penurunan temperatur dan kemampuan pasir silika dalam mempertahankan panas. Data hasil pengujian kemudian diperiksa, diurutkan berdasarkan waktu, dan dikelompokkan menjadi tahap pemanasan serta pendinginan.

Hasil ketiga pengujian dibandingkan berdasarkan temperatur maksimum, kenaikan temperatur, laju pemanasan, penurunan temperatur, dan kemampuan penyimpanan panas. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan panel surya, elemen pemanas, dan penyempurnaan isolasi termal terhadap kinerja prototipe *sand battery*.

5.2 Pengujian Panel Surya

5.2.1 Pengujian Daya Panel Surya

Pengujian daya panel surya dilakukan untuk mengetahui kemampuan panel surya dalam menyuplai energi listrik secara langsung menuju elemen pemanas pada prototipe *sand battery*. Parameter kelistrikan yang diamati meliputi tegangan, arus, dan daya selama proses pemanasan pasir silika.

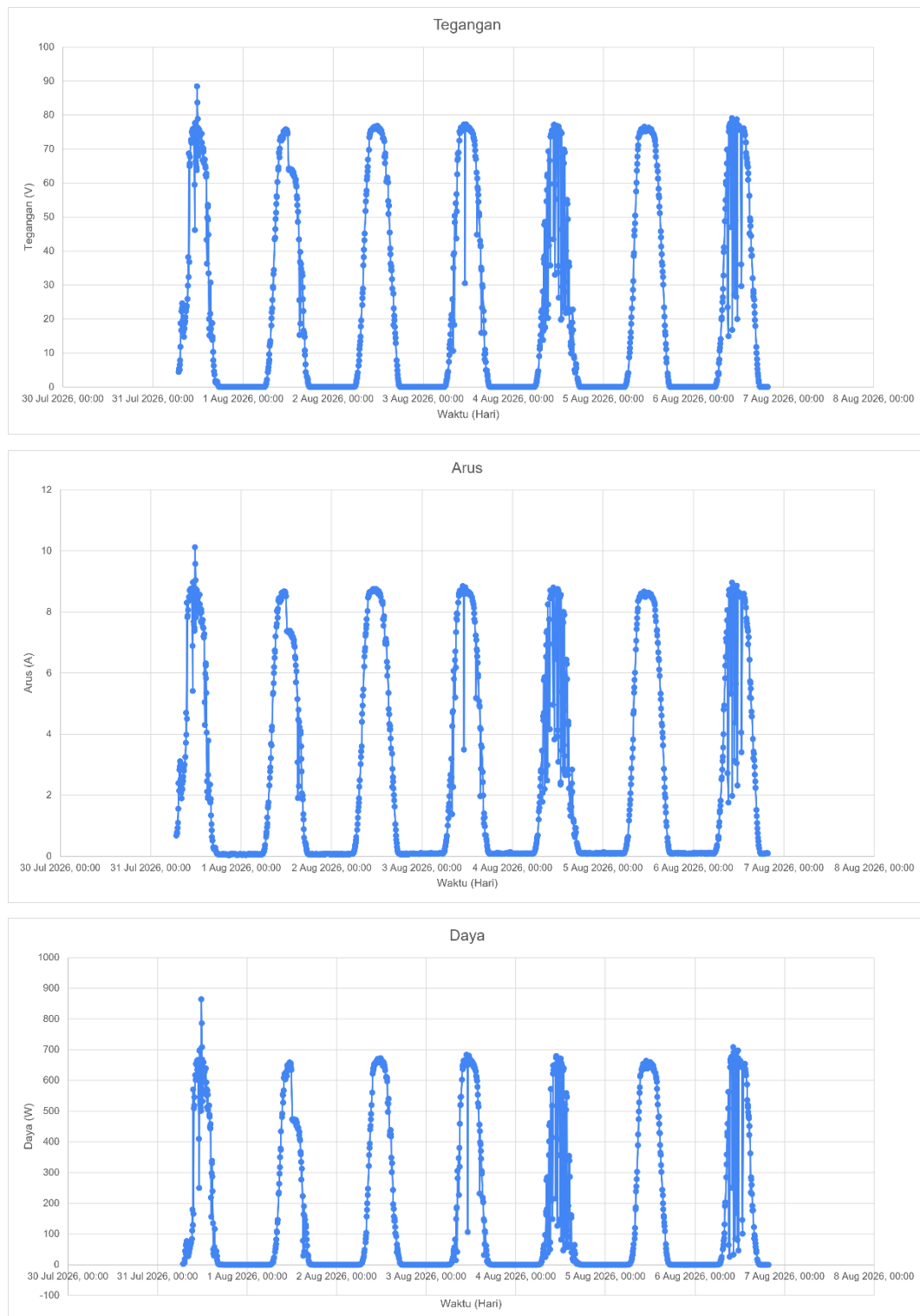
Pengujian daya dilakukan pada dua periode, yaitu 15 sampai 18 Juli 2026 dan 31 Juli sampai 3 Agustus 2026. Kedua pengujian menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Pada pengujian 15 sampai 18 Juli 2026, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada sisi tabung, tetapi bagian penutup belum dilapisi aluminium foil. Sementara itu, pada pengujian 31 Juli sampai 3 Agustus 2026, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada seluruh sisi tabung, termasuk bagian penutup.

Data pengujian 6 sampai 8 Juli 2026 tidak dimasukkan dalam pembahasan daya karena data pada periode tersebut hanya memuat temperatur pasir. Data tegangan, arus, dan daya tersedia pada dua periode pengujian berikutnya.

5.2.2 Pengujian Daya Panel Surya Periode 15 sampai 18 Juli 2026

Pengujian periode 15 sampai 18 Juli 2026 dilakukan menggunakan dua panel surya yang dihubungkan dengan dua elemen pemanas. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui perubahan tegangan, arus, dan daya listrik yang diterima elemen pemanas selama proses pengujian.

Hasil pengujian ditampilkan dalam tiga grafik terpisah agar perubahan setiap parameter dapat diamati dengan lebih jelas. Grafik pertama menunjukkan perubahan tegangan, grafik kedua menunjukkan perubahan arus, dan grafik ketiga menunjukkan daya yang disalurkan menuju elemen pemanas.



Gambar 5. 1 Grafik Tegangan, Arus, dan Daya 15-18 Juli

Berdasarkan Gambar 5.1, tegangan, arus, dan daya mengalami perubahan selama proses pengujian. Nilai ketiga parameter meningkat ketika panel surya

menerima radiasi matahari dan menurun ketika kondisi penyinaran berkurang. Ketika tidak terdapat penyinaran matahari yang cukup, tegangan dan daya panel turun hingga mendekati nol.

Tegangan tertinggi berdasarkan pembacaan sistem monitoring mencapai sekitar 91,08 V. Pada saat kondisi operasi relatif tinggi, tegangan cenderung berada pada nilai yang cukup stabil. Setelah intensitas penyinaran berkurang, tegangan mengalami penurunan secara bertahap.

Arus menunjukkan pola perubahan yang hampir sama dengan tegangan. Arus meningkat ketika panel menerima radiasi matahari yang tinggi dan menurun ketika intensitas penyinaran berkurang. Arus tertinggi berdasarkan pembacaan sistem monitoring mencapai sekitar 13,50 A.

Perubahan tegangan dan arus menyebabkan daya yang disalurkan menuju elemen pemanas ikut berubah. Ketika tegangan dan arus meningkat, daya panel juga mengalami peningkatan. Sebaliknya, penurunan tegangan dan arus menyebabkan daya menuju elemen pemanas berkurang.

Daya maksimum berdasarkan sistem monitoring tercatat sekitar 1.230 W. Nilai tersebut melebihi kapasitas nominal gabungan dua panel surya sebesar 1.090 Wp dan daya nominal gabungan dua elemen pemanas sebesar 1.000 W. Kombinasi tegangan 91,08 V dan arus 13,50 A juga tidak sesuai dengan karakteristik operasi nominal panel. Arus tersebut telah melampaui I_{mp} modul sebesar 13,04 A, sedangkan arus yang mendekati I_{sc} umumnya terjadi ketika tegangan panel jauh lebih rendah daripada tegangan rangkaian terbuka.

Berdasarkan tegangan dan arus tersebut, resistansi semu beban pada pengujian Juli adalah:

$$R_{\text{semu}} = \frac{91,08}{13,50} = 6,75 \, \Omega$$

Sementara itu, data operasi stabil pada pengujian Agustus menunjukkan tegangan 77,21 V dan arus 8,85 A, sehingga diperoleh:

$$R_{\text{semu}} = \frac{77,21}{8,85} = 8,72 \, \Omega$$

Kedua nilai tersebut berbeda dari resistansi nominal dua elemen pemanas yang terhubung seri, yaitu $7,056 \Omega$. Perbedaan resistansi semu dari $6,75 \Omega$ menjadi $8,72 \Omega$ menunjukkan bahwa data tegangan dan arus belum sepenuhnya konsisten. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya galat kalibrasi sensor tegangan atau ACS712, perubahan resistansi elemen pemanas akibat temperatur, resistansi kabel dan sambungan, atau ketidaksamaan waktu pencatatan tegangan dan arus.

Oleh karena itu, nilai 1.230 W tidak digunakan sebagai daya aktual panel, tetapi hanya disebut sebagai pembacaan maksimum sistem monitoring yang memerlukan verifikasi. Resistansi setiap elemen pemanas serta tegangan dan arus sistem perlu diukur menggunakan alat ukur referensi untuk memastikan ketepatan faktor kalibrasi sensor.

Nilai daya yang melampaui kapasitas nominal dapat dipengaruhi oleh ketidakakuratan sensor tegangan atau arus, kesalahan faktor kalibrasi, gangguan pembacaan sinyal, atau kesalahan dalam proses pencatatan data. Dengan demikian, nilai 1.230 W lebih tepat dinyatakan sebagai daya maksimum berdasarkan sistem monitoring dan masih memerlukan verifikasi menggunakan alat ukur pembanding yang telah dikalibrasi.

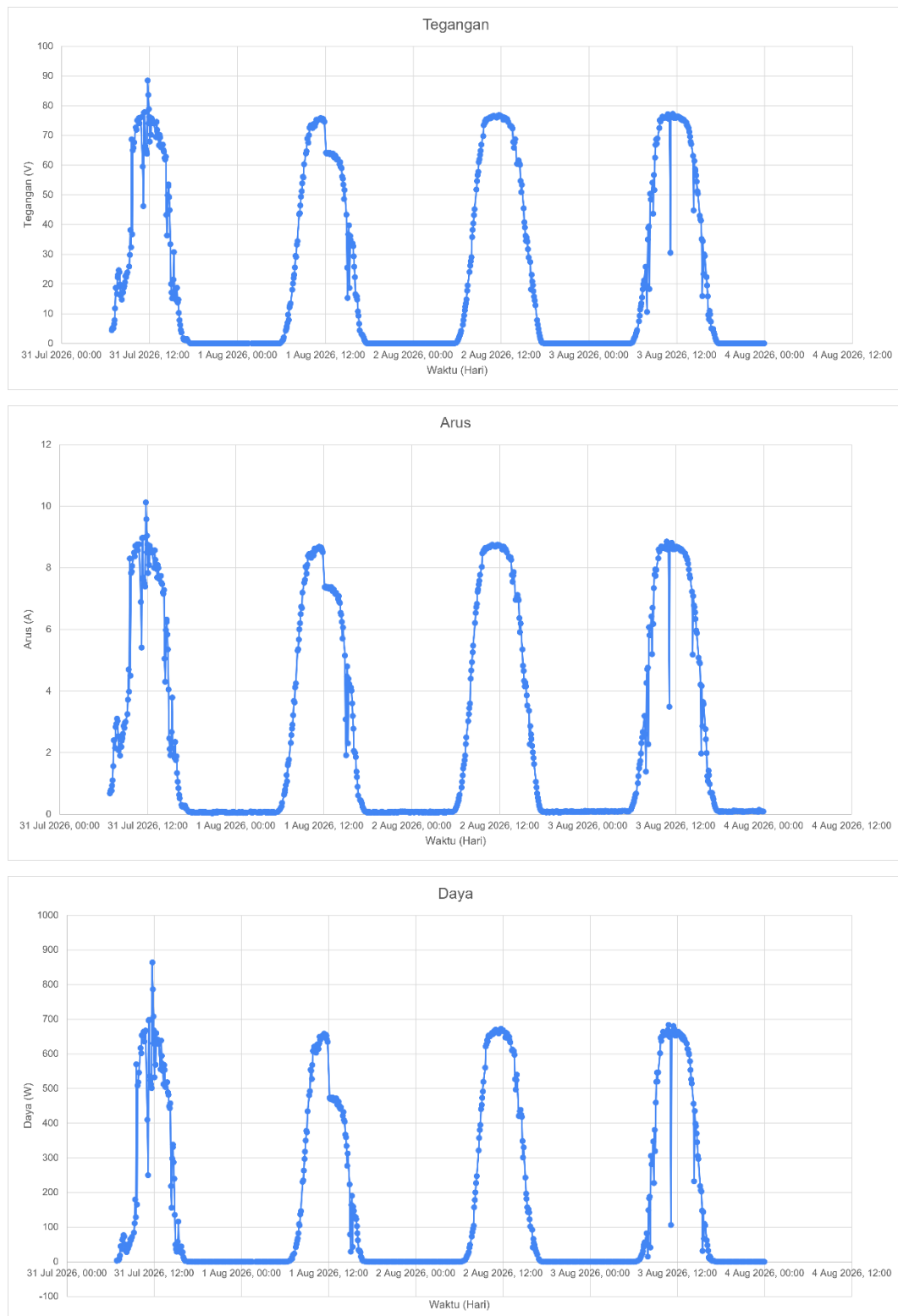
Grafik periode 15 sampai 18 Juli 2026 juga menunjukkan beberapa perubahan nilai yang terjadi secara tiba-tiba. Fluktuasi tersebut dapat dipengaruhi oleh perubahan penerimaan radiasi matahari, tutupan awan, bayangan pada permukaan panel, kestabilan sambungan kelistrikan, dan perubahan pembacaan sensor.

Walaupun keluaran panel surya mengalami fluktuasi, kedua panel tetap mampu menyuplai energi listrik menuju kedua elemen pemanas. Energi listrik tersebut kemudian diubah menjadi panas dan digunakan untuk meningkatkan temperatur pasir silika.

5.2.3 Pengujian Daya Panel Surya Periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026

Pengujian periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026 menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas yang masing-masing dihubungkan secara seri. Pada konfigurasi ini, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada seluruh sisi tabung, termasuk bagian penutup.

Data yang diamati meliputi tegangan, arus, dan daya panel surya selama proses pemanasan pasir silika. Data panel referensi juga dicatat untuk menunjukkan kecenderungan perubahan kondisi penyinaran. Namun, data tersebut hanya digunakan sebagai nilai estimasi karena sistem pengukuran belum dikalibrasi menggunakan piranometer atau *solar power meter*.



Gambar 5. 2 Grafik Tegangan, Arus, dan Daya 31 Juli - 3 Agustus

Berdasarkan Gambar 5.2, tegangan, arus, dan daya menunjukkan pola perubahan yang berulang setiap hari. Ketiga parameter mulai meningkat pada pagi hari, mencapai nilai relatif tinggi menjelang siang, kemudian menurun pada sore hari hingga mendekati nol.

Grafik tegangan menunjukkan bahwa tegangan operasi selama kondisi penyinaran tinggi umumnya berada pada kisaran 70 sampai 77 V. Tegangan tertinggi tercatat 88,47 V pada 31 Juli 2026. Nilai maksimum pada 1 sampai 3 Agustus relatif lebih stabil dan berada pada kisaran 75 sampai 77 V.

Grafik arus memperlihatkan pola yang hampir sama dengan grafik tegangan. Arus meningkat secara bertahap pada pagi hari dan mencapai nilai maksimum ketika penerimaan radiasi matahari relatif tinggi. Arus tertinggi tercatat 10,12 A pada 31 Juli 2026. Sementara itu, arus maksimum tercatat sebesar 8,68 A pada pukul 11.22. Selanjutnya, arus maksimum pada 2 dan 3 Agustus 2026 masing-masing sebesar 8,75 A pada pukul 10.59 dan 8,85 A pada pukul 10.46

Perubahan tegangan dan arus memengaruhi daya listrik yang diterima elemen pemanas. Ketika tegangan dan arus meningkat, daya panel ikut meningkat. Setelah melewati periode penyinaran maksimum, tegangan dan arus mulai menurun sehingga daya juga mengalami penurunan.

Pada 31 Juli 2026 pukul 11.44, sistem monitoring mencatat tegangan sebesar 88,47 V, arus sebesar 10,12 A, dan daya sebesar 864,36 W. Namun, berdasarkan perhitungan ulang menggunakan perkalian tegangan dan arus pada waktu pencatatan yang sama, diperoleh daya sebesar:

$$P = V \times I$$

$$P = 88,47 \times 10,12$$

$$P = 895,32 \text{ W}$$

Hasil tersebut menunjukkan adanya selisih sebesar 30,96 W atau sekitar 3,46% antara daya yang tersimpan pada sistem monitoring dan daya hasil perhitungan ulang. Ketidaksesuaian tersebut mengindikasikan bahwa nilai tegangan, arus, dan daya belum tersimpan secara sepenuhnya sinkron.

Arduino Nano memperbarui dan mengirimkan data tegangan serta arus menuju ESP32 setiap 500 milidetik, sedangkan data pengujian dikirimkan menuju

Google Spreadsheet setiap lima menit. Perbedaan waktu pembaruan variabel, keterlambatan komunikasi UART, serta perubahan keluaran panel dalam waktu singkat dapat menyebabkan nilai daya dihitung menggunakan data tegangan dan arus dari waktu pembacaan yang berbeda.

Berdasarkan tegangan dan arus pada baris pencatatan yang sama, resistansi semu beban dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_{\text{semu}} = \frac{V}{I}$$

$$R_{\text{semu}} = \frac{88,47}{10,12} = 8,74 \, \Omega$$

Nilai tersebut lebih tinggi daripada resistansi nominal dua elemen pemanas yang dihubungkan secara seri, yaitu $7,056 \, \Omega$. Perbedaan ini dapat dipengaruhi oleh perubahan resistansi elemen pemanas akibat kenaikan temperatur, resistansi kabel dan sambungan, galat kalibrasi sensor tegangan dan ACS712, serta ketidaksinkronan waktu pembacaan data.

Oleh karena itu, nilai $864,36 \, \text{W}$ dinyatakan sebagai daya yang tercatat oleh sistem monitoring, sedangkan nilai $895,32 \, \text{W}$ merupakan daya hasil perhitungan ulang berdasarkan tegangan dan arus pada waktu pencatatan yang sama. Untuk menjaga konsistensi analisis, perhitungan energi listrik pada Subbab 5.5 sebaiknya menggunakan daya yang dihitung kembali dari tegangan dan arus pada setiap baris data.

Pada 1 Agustus 2026, daya maksimum tercatat sekitar $658,20 \, \text{W}$. Pada 2 Agustus 2026, daya maksimum meningkat menjadi sekitar $672,53 \, \text{W}$. Selanjutnya, pada 3 Agustus 2026, daya maksimum mencapai sekitar $683,31 \, \text{W}$.

Dibandingkan dengan data tanggal 31 Juli, pola daya pada 1 sampai 3 Agustus terlihat lebih stabil. Kurva daya meningkat secara bertahap pada pagi hari, membentuk daerah puncak menjelang siang, kemudian menurun secara bertahap pada sore hari.

Daya maksimum harian juga memperlihatkan sedikit peningkatan, yaitu dari $658,20 \, \text{W}$ pada 1 Agustus menjadi $672,53 \, \text{W}$ pada 2 Agustus dan $683,31 \, \text{W}$ pada 3 Agustus. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh perubahan kondisi radiasi matahari dan temperatur permukaan panel.

Beberapa penurunan tegangan, arus, dan daya dalam waktu singkat tetap terlihat pada grafik. Penurunan tersebut dapat disebabkan oleh awan atau bayangan yang menghalangi permukaan panel. Selain itu, kestabilan sambungan dan sistem monitoring perlu diperiksa karena beberapa penurunan terjadi secara tajam.

Pada malam hari, tegangan dan daya panel berada di sekitar nol karena tidak terdapat radiasi matahari. Dalam kondisi tersebut, elemen pemanas tidak memberikan masukan panas yang berarti. Namun, temperatur pasir tidak langsung turun mengikuti perubahan daya karena energi panas masih tersimpan di dalam pasir dan komponen sistem.

Perubahan temperatur pasir berlangsung lebih lambat daripada perubahan daya panel. Pasir silika memiliki massa sebesar 57 kg sehingga membutuhkan waktu untuk menerima, menyebarkan, dan melepaskan panas. Akibatnya, grafik temperatur menunjukkan perubahan yang lebih halus dibandingkan grafik daya listrik.

Secara keseluruhan, dua panel surya mampu menyuplai energi listrik menuju dua elemen pemanas selama periode penyinaran. Daya maksimum berdasarkan sistem monitoring mencapai 864,36 W pada 31 Juli 2026. Namun, daya maksimum harian pada kondisi operasi yang lebih stabil berada pada kisaran 658,20 sampai 683,31 W.

5.2.4 Perhitungan dan Analisis Daya Maksimum Panel Surya

Perhitungan daya maksimum dilakukan untuk mengetahui daya tertinggi yang dihasilkan panel surya dan disalurkan menuju elemen pemanas. Daya listrik diperoleh dari perkalian antara tegangan dan arus yang tercatat pada waktu pengukuran yang sama.

Besarnya daya listrik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \times I$$

Keterangan:

P adalah daya listrik panel surya dalam watt;

V adalah tegangan keluaran panel surya dalam volt; dan

I adalah arus keluaran panel surya dalam ampere.

5.2.5 Daya Maksimum Periode 15 sampai 18 Juli 2026

Pada periode 15 sampai 18 Juli 2026, tegangan dan arus maksimum yang tercatat secara bersamaan adalah 91,084 V dan 13,504 A. Perhitungan daya maksimum adalah:

$$P_{\text{maks}} = 91,084 \times 13,504$$

$$P_{\text{maks}} = 1.229,99 \text{ W}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, daya maksimum berdasarkan sistem monitoring mencapai sekitar 1.230 W.

Apabila dibandingkan dengan kapasitas nominal gabungan kedua panel sebesar 1.090 Wp, rasio daya maksimum terhadap kapasitas nominal panel adalah:

$$K_p = \frac{1.229,99}{1.090} \times 100\%$$

$$K_p = 112,84\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan daya maksimum mencapai 112,84% dari kapasitas nominal gabungan panel. Nilai yang melampaui kapasitas nominal menunjukkan perlunya pemeriksaan terhadap akurasi dan kalibrasi sensor.

Oleh karena itu, nilai 1.230 W tidak langsung dinyatakan sebagai daya aktual panel, tetapi sebagai daya maksimum berdasarkan pembacaan sistem monitoring.

5.2.6 Daya Maksimum Periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026

Pada periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026, daya maksimum berdasarkan sistem monitoring tercatat sebesar 864,36 W pada 31 Juli 2026.

Perbandingan daya maksimum tersebut terhadap kapasitas nominal gabungan panel adalah:

$$K_p = \frac{864,36}{1.090} \times 100\%$$

$$K_p = 79,30\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa daya maksimum terukur mencapai sekitar 79,30% dari kapasitas nominal gabungan panel. Persentase tersebut bukan efisiensi panel, tetapi perbandingan antara daya operasi maksimum dan kapasitas nominal panel pada kondisi pengujian standar.

Namun, nilai 864,36 W merupakan nilai sesaat dan berada pada bagian data yang berfluktuasi. Oleh karena itu, daya maksimum tanggal 1 sampai 3 Agustus juga perlu digunakan untuk menggambarkan kondisi operasi yang lebih stabil.

Pada 1 Agustus 2026, daya maksimum tercatat sebesar 658,20 W. Pada 2 Agustus 2026, daya maksimum mencapai 672,53 W. Pada 3 Agustus 2026, daya maksimum mencapai 683,31 W.

Nilai 683,31 W pada 3 Agustus diperoleh pada tegangan sekitar 77,21 V dan arus sekitar 8,85 A:

$$P_{\text{maks}} = 77,21 \times 8,85$$

$$P_{\text{maks}} \approx 683,31 \text{ W}$$

Rasio daya tersebut terhadap kapasitas nominal gabungan panel adalah:

$$K_p = \frac{683,31}{1.090} \times 100\%$$

$$K_p = 62,69\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa daya maksimum pada kondisi operasi yang relatif stabil mencapai sekitar 62,69% dari kapasitas nominal gabungan panel.

Daya operasi yang berada di bawah kapasitas nominal dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. intensitas radiasi matahari;
2. temperatur permukaan panel;
3. sudut pemasangan panel;
4. tutupan awan atau bayangan;
5. rugi-rugi pada kabel dan sambungan;
6. karakteristik resistansi elemen pemanas;
7. tidak digunakannya sistem MPPT; dan
8. ketelitian sensor tegangan dan arus.

Jika dibandingkan, periode 15 sampai 18 Juli menghasilkan pembacaan daya maksimum yang lebih tinggi daripada periode 31 Juli sampai 3 Agustus. Namun, nilai 1.230 W melebihi kapasitas nominal panel sehingga memerlukan verifikasi kalibrasi.

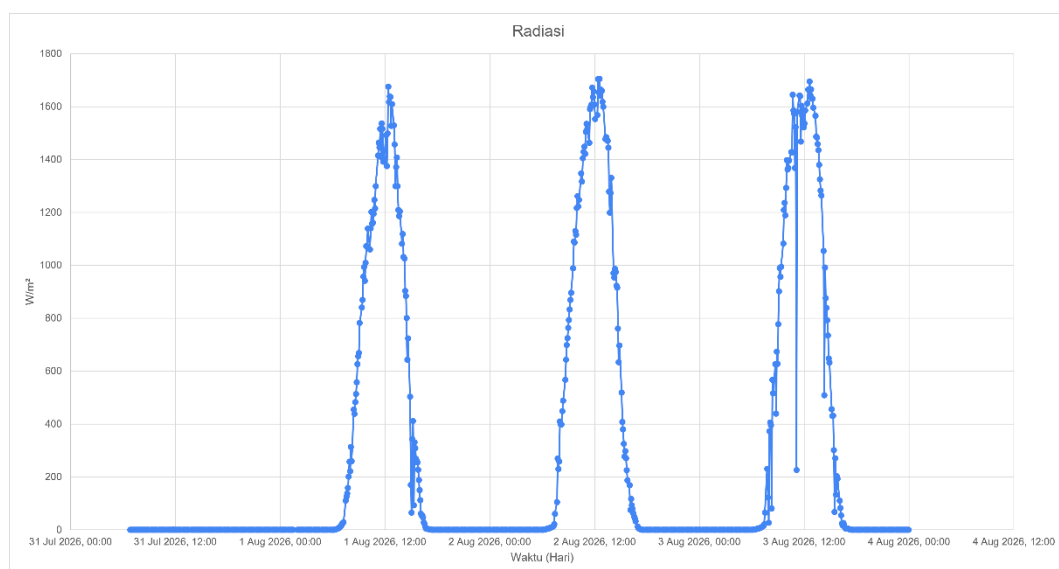
Sementara itu, periode 31 Juli sampai 3 Agustus menghasilkan daya operasi yang lebih rendah, tetapi pola keluarannya terlihat lebih stabil pada 1 sampai 3 Agustus. Daya maksimum harian pada periode operasi stabil berada pada kisaran 658,20 sampai 683,31 W.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua panel surya mampu menyuplai dua elemen pemanas secara langsung. Besarnya daya berubah mengikuti kondisi penyinaran matahari. Perubahan daya tersebut selanjutnya memengaruhi kenaikan temperatur pasir silika yang dibahas pada Subbab 5.3.

5.2.7 Analisis Hubungan Radiasi Matahari dan Daya Panel Surya

Data radiasi matahari digunakan untuk mengetahui hubungan antara kondisi penyinaran dengan daya listrik yang dihasilkan panel surya. Berdasarkan hasil pengujian, perubahan radiasi menunjukkan kecenderungan yang searah dengan perubahan daya panel.

Pada pagi hari, peningkatan radiasi menyebabkan tegangan dan arus panel meningkat. Peningkatan kedua parameter tersebut menyebabkan daya yang disalurkan menuju elemen pemanas ikut bertambah. Setelah melewati periode penyinaran maksimum, radiasi mulai menurun dan diikuti oleh penurunan tegangan, arus, serta daya panel.



Gambar 5. 3 Grafik Radiasi

Data panel surya referensi digunakan untuk mengamati kecenderungan perubahan kondisi penyinaran selama pengujian. Nilai yang dihasilkan belum dapat dinyatakan sebagai iradiasi matahari absolut karena sistem pengukuran belum dikalibrasi menggunakan piranometer atau *solar power meter*. Selain itu, berdasarkan Gambar 5.3 beberapa hasil perhitungan melebihi 1.600 W/m^2 , sedangkan total irradiansi matahari rata-rata di luar atmosfer bumi berada di sekitar 1.361 W/m^2 [21].

Oleh karena itu, data panel referensi dalam penelitian ini dinyatakan sebagai **indeks estimasi penyinaran** dan hanya digunakan untuk menganalisis kecenderungan perubahan penyinaran terhadap daya panel utama. Nilai indeks tersebut dapat dipengaruhi oleh temperatur panel referensi, karakteristik beban resistor, luas aktif panel, sudut pemasangan, kondisi permukaan panel, orientasi terhadap matahari, dan faktor konversi dalam program [2], [3].

Pada 1 Agustus 2026, indeks estimasi penyinaran tertinggi tercatat sebesar 1.675,93 pada pukul 12.22, sedangkan daya maksimum panel utama sebesar 658,20 W terjadi pada pukul 11.22. Pada 2 Agustus 2026, indeks estimasi penyinaran tertinggi sebesar 1.705,49 tercatat pada pukul 12.34, sedangkan daya maksimum sebesar 672,53 W terjadi pada pukul 11.44. Pada 3 Agustus 2026, indeks estimasi penyinaran tertinggi sebesar 1.695,26 tercatat pada pukul 12.37, sedangkan daya maksimum sebesar 683,31 W terjadi pada pukul 10.46.

Perbedaan waktu antara indeks estimasi penyinaran tertinggi dan daya maksimum masing-masing sebesar 60 menit pada 1 Agustus, 50 menit pada 2 Agustus, dan 111 menit pada 3 Agustus 2026. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keluaran maksimum panel referensi tidak selalu terjadi bersamaan dengan daya maksimum panel utama.

Perbedaan waktu tersebut dapat dipengaruhi oleh orientasi dan sudut pemasangan panel referensi, temperatur modul, kondisi bayangan, karakteristik beban resistor tetap, serta sinkronisasi pencatatan data. Selain itu, panel utama dihubungkan secara langsung dengan elemen pemanas tanpa menggunakan MPPT. Oleh karena itu, titik operasi panel utama ditentukan oleh perpotongan karakteristik I–V panel dengan karakteristik beban resistif [2], [3].

Hasil analisis menunjukkan bahwa indeks estimasi penyinaran dan daya panel memiliki hubungan positif yang kuat. Koefisien korelasi Pearson pada 1 Agustus 2026 sebesar 0,963, pada 2 Agustus 2026 sebesar 0,989, dan pada 3 Agustus 2026 sebesar 0,992. Koefisien determinasi masing-masing hari sebesar 0,928, 0,978, dan 0,984. Nilai tersebut menunjukkan bahwa peningkatan indeks estimasi penyinaran secara umum diikuti oleh peningkatan daya panel utama.

Meskipun hubungan kedua parameter tergolong kuat, hasil tersebut tidak menunjukkan bahwa indeks estimasi penyinaran telah akurat dalam satuan W/m^2 . Korelasi yang tinggi hanya menunjukkan bahwa keluaran panel referensi berubah searah dengan keluaran panel utama. Untuk memperoleh nilai iradiasi matahari absolut, panel referensi perlu dikalibrasi menggunakan piranometer atau *solar power meter* pada orientasi dan kondisi lingkungan yang sama.

Berdasarkan hasil tersebut, kondisi penyinaran memiliki hubungan positif dengan daya listrik yang dihasilkan panel surya. Namun, daya maksimum tidak selalu terjadi bersamaan dengan indeks penyinaran tertinggi karena keluaran panel juga dipengaruhi oleh temperatur modul, karakteristik beban resistif, orientasi panel, kondisi bayangan, rugi-rugi sambungan, dan tidak digunakannya MPPT [2], [3].

5.3 Pengujian Kenaikan Suhu Pasir

Pengujian kenaikan temperatur pasir silika dilakukan untuk mengetahui kemampuan prototipe *sand battery* dalam menerima dan menyimpan panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas. Pengujian juga bertujuan mengetahui pengaruh jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan penyempurnaan isolasi termal terhadap temperatur pasir silika.

Temperatur pasir diukur menggunakan dua thermocouple tipe K yang ditempatkan pada dua titik berbeda. Hasil pengukuran ditampilkan sebagai Suhu 1, Suhu 2, dan suhu rata-rata. Suhu 1 dan Suhu 2 digunakan untuk mengamati perubahan temperatur pada masing-masing titik, sedangkan suhu rata-rata digunakan untuk menggambarkan kecenderungan temperatur pasir selama proses pemanasan.

Pengujian dilakukan menggunakan tiga konfigurasi. Pengujian pertama menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas dengan gasket dan rockwool pada bagian penutup. Pengujian kedua menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada sisi tabung, tetapi aluminium foil belum dipasang pada penutup. Pengujian ketiga menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup.

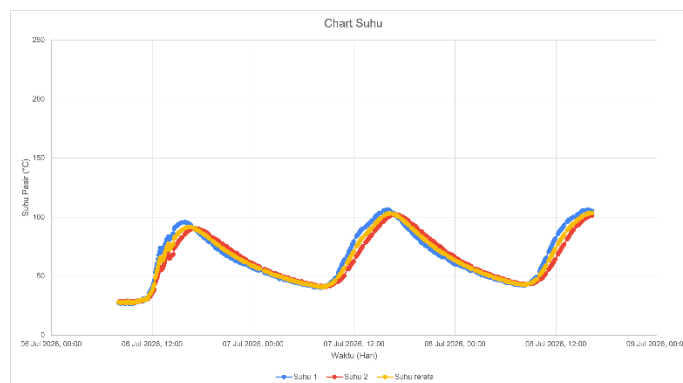
5.3.1 Pengujian Periode 6 sampai 8 Juli 2026

Pengujian konfigurasi pertama dilakukan pada 6 sampai 8 Juli 2026 menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur awal, temperatur maksimum, kenaikan temperatur, durasi pemanasan, dan laju pemanasan rata-rata. Temperatur pasir ditentukan berdasarkan nilai rata-rata hasil pembacaan dua thermocouple yang ditempatkan pada titik berbeda di dalam media pasir silika.

Pada 6 Juli 2026, temperatur rata-rata awal pasir tercatat sebesar 28,00°C pada pukul 08.01. Temperatur kemudian meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 91,63°C pada pukul 16.18. Dengan demikian, kenaikan temperatur yang diperoleh sebesar 63,63°C selama 8,28 jam, sehingga laju pemanasan rata-ratanya mencapai 7,68°C/jam.

Pada 7 Juli 2026, temperatur rata-rata awal pasir sebesar 41,00°C pada pukul 08.00. Temperatur maksimum sebesar 103,38°C tercapai pada pukul 16.12. Kenaikan temperatur pada hari kedua mencapai 62,38°C selama 8,20 jam, sehingga diperoleh laju pemanasan rata-rata sebesar 7,61°C/jam. Temperatur awal yang lebih tinggi dibandingkan hari pertama menunjukkan bahwa sebagian energi termal hasil pemanasan sebelumnya masih tersimpan di dalam pasir.

Pada 8 Juli 2026, temperatur rata-rata awal tercatat sebesar 42,75°C pada pukul 08.08. Temperatur kemudian meningkat hingga mencapai nilai maksimum keseluruhan sebesar **103,63°C pada pukul 16.01**. Kenaikan temperatur pada hari ketiga sebesar 60,88°C dalam durasi 7,88 jam, sehingga laju pemanasan rata-ratanya mencapai 7,72°C/jam.



Gambar 5. 4 Grafik Kenaikan Suhu Pasir 6-8 Juli

Berdasarkan Gambar 5. 4, rata-rata temperatur maksimum selama tiga hari pengujian adalah **99,54°C**, dengan temperatur maksimum keseluruhan sebesar **103,63°C** pada 8 Juli 2026. Temperatur maksimum pada hari kedua dan ketiga telah melampaui 100°C, sedangkan temperatur maksimum hari pertama mencapai 91,63°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa satu panel surya dan satu elemen pemanas mampu meningkatkan temperatur rata-rata 57 kg pasir silika hingga melampaui 100°C pada kondisi penyinaran yang mendukung.

Laju pemanasan harian berada pada rentang 7,61 sampai 7,72°C/jam, dengan rata-rata sebesar 7,67°C/jam. Rentang yang relatif kecil menunjukkan bahwa kecepatan kenaikan temperatur selama tiga hari memiliki pola yang cukup serupa. Meskipun demikian, temperatur maksimum dan durasi pemanasan tetap dipengaruhi oleh kondisi penyinaran matahari, temperatur awal pasir, perubahan daya panel, serta kehilangan panas dari tabung menuju lingkungan.

Temperatur awal pada hari kedua dan ketiga lebih tinggi daripada hari pertama. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pasir belum kembali ke temperatur awal pengujian setelah mengalami pendinginan pada malam hari. Oleh karena itu, temperatur maksimum yang lebih tinggi pada hari kedua dan ketiga tidak hanya dipengaruhi oleh energi listrik yang diterima pada hari tersebut, tetapi juga oleh energi termal yang masih tersimpan dari pengujian sebelumnya.

Perbedaan pembacaan antara kedua thermocouple juga menunjukkan bahwa distribusi temperatur di dalam pasir belum sepenuhnya seragam. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh posisi sensor terhadap elemen pemanas, jarak

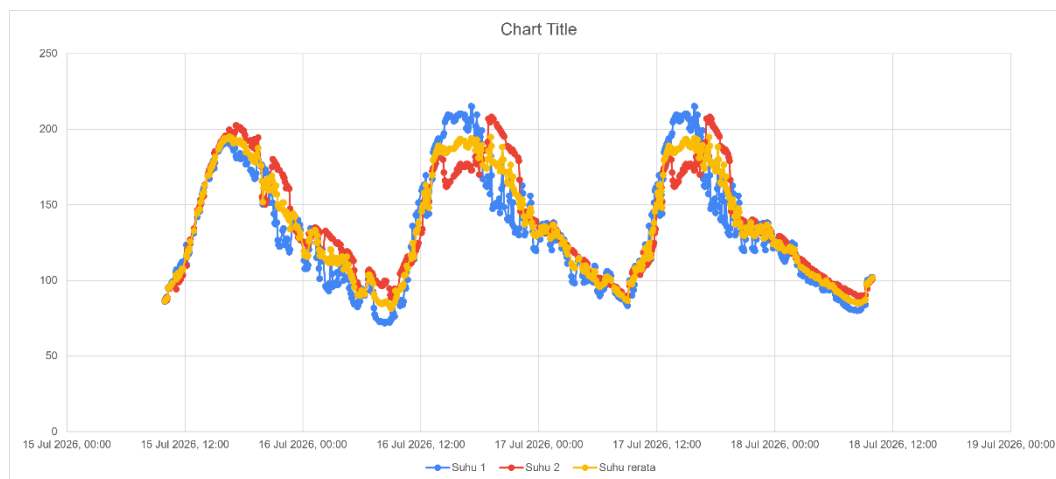
sensor dari dinding tabung, serta rendahnya perpindahan panas secara konveksi di dalam media pasir padat. Oleh karena itu, temperatur rata-rata dari kedua thermocouple digunakan untuk mewakili kondisi termal pasir secara lebih umum.

Secara keseluruhan, konfigurasi pertama telah mampu menghasilkan temperatur rata-rata maksimum sebesar $103,63^{\circ}\text{C}$. Namun, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa proses pemanasan membutuhkan waktu sekitar 7,88 sampai 8,28 jam serta masih mengalami kehilangan panas menuju lingkungan. Temuan tersebut menjadi dasar pengembangan konfigurasi berikutnya melalui penambahan panel surya, elemen pemanas, dan penyempurnaan isolasi termal.

5.3.2 Pengujian Periode 15 sampai 18 Juli 2026

Pengujian periode 15 sampai 18 Juli 2026 menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Pada konfigurasi ini, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada sisi tabung, tetapi aluminium foil belum dipasang pada bagian penutup.

Penambahan panel surya bertujuan meningkatkan daya yang dapat disalurkan menuju elemen pemanas. Penggunaan dua elemen pemanas juga bertujuan memperluas area pemanasan di dalam media pasir silika.



Gambar 5. 5 Grafik Kenaikan Suhu Pasir 15-18 Juli

Berdasarkan Gambar 5.5, temperatur pasir mengalami tiga siklus pemanasan utama. Setiap siklus ditandai dengan peningkatan temperatur pada pagi hingga sore hari, kemudian diikuti penurunan temperatur pada malam hingga pagi hari berikutnya.

Pada 15 Juli 2026, pencatatan data dimulai pukul 09.58 ketika temperatur rata-rata pasir telah mencapai $86,50^{\circ}\text{C}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pencatatan tidak dimulai sejak kondisi awal pemanasan. Kemungkinan, elemen pemanas telah bekerja sebelum sistem *data logging* diaktifkan atau pengujian merupakan kelanjutan dari proses pemanasan sebelumnya. Oleh karena itu, nilai $86,50^{\circ}\text{C}$ dinyatakan sebagai **temperatur awal pencatatan**, bukan temperatur awal pasir sebelum pemanasan. Kondisi ini menyebabkan kenaikan temperatur dan laju pemanasan sejak awal proses tidak dapat ditentukan secara menyeluruh hanya berdasarkan data tanggal 15 Juli 2026.

Temperatur rata-rata pasir pada 15 Juli 2026 terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar **$195,13^{\circ}\text{C}$ pada pukul 16.31**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar **$190,50^{\circ}\text{C}$** , sedangkan Suhu 2 sebesar **$199,75^{\circ}\text{C}$** . Selisih temperatur antara kedua titik pengukuran mencapai **$9,25^{\circ}\text{C}$** , yang menunjukkan bahwa distribusi temperatur di dalam pasir belum sepenuhnya seragam. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh posisi masing-masing thermocouple terhadap elemen pemanas, dinding tabung, dan jalur kehilangan panas.

Setelah mencapai nilai maksimum, temperatur rata-rata pasir mengalami penurunan secara bertahap akibat berkurangnya daya dari panel surya dan berlangsungnya pelepasan panas menuju lingkungan. Hingga pergantian hari, temperatur pasir masih berada di atas 100°C . Pada 16 Juli 2026 pukul 00.07, temperatur rata-rata masih tercatat sebesar **$119,38^{\circ}\text{C}$** , dengan Suhu 1 sebesar **$113,25^{\circ}\text{C}$** dan Suhu 2 sebesar **$125,50^{\circ}\text{C}$** . Data tersebut menunjukkan bahwa sebagian energi termal hasil pemanasan tanggal 15 Juli masih tersimpan di dalam pasir setelah tidak lagi memperoleh masukan energi listrik yang berarti.

Temperatur rata-rata terus menurun selama proses pendinginan dan mencapai **$81,38^{\circ}\text{C}$ pada pukul 08.59**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar **$74,00^{\circ}\text{C}$** , sedangkan Suhu 2 sebesar **$88,75^{\circ}\text{C}$** . Dengan demikian, sejak temperatur maksimum tanggal 15 Juli sebesar $195,13^{\circ}\text{C}$ hingga pukul 08.59 tanggal 16 Juli, terjadi penurunan temperatur rata-rata sebesar **$113,75^{\circ}\text{C}$** . Meskipun demikian,

temperatur pasir masih jauh lebih tinggi daripada temperatur lingkungan, sehingga menunjukkan bahwa energi termal belum seluruhnya dilepaskan.

Pada 16 Juli 2026, temperatur pasir kembali meningkat ketika panel surya mulai menghasilkan daya dan menyuplai energi menuju elemen pemanas. Suhu 1 mencapai nilai maksimum sebesar **215,25°C pada pukul 17.07**, sedangkan pada waktu yang sama Suhu 2 tercatat sebesar **172,75°C**, sehingga temperatur rata-ratanya sebesar **194,00°C**. Selisih pembacaan kedua sensor pada waktu tersebut mencapai **42,50°C**.

Suhu 2 mencapai nilai maksimum yang berbeda waktu, yaitu sebesar **208,25°C pada pukul 19.17**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar **169,50°C**, sedangkan temperatur rata-ratanya sebesar **188,88°C**. Perbedaan waktu pencapaian temperatur maksimum Suhu 1 dan Suhu 2 menunjukkan bahwa perpindahan panas di dalam pasir berlangsung secara bertahap dan tidak merata. Sensor yang lebih dekat dengan elemen pemanas dapat merespons kenaikan temperatur lebih cepat, sedangkan titik lain mengalami kenaikan setelah panas merambat melalui media pasir.

Berdasarkan data tersebut, pencapaian nilai maksimum pada salah satu thermocouple tidak dapat langsung dianggap sebagai temperatur keseluruhan pasir. Oleh karena itu, evaluasi kinerja termal lebih tepat menggunakan temperatur rata-rata kedua sensor. Penilaian terhadap distribusi temperatur tetap dilakukan berdasarkan selisih pembacaan Suhu 1 dan Suhu 2 pada waktu yang sama.

Pada 16 Juli 2026, temperatur rata-rata pasir mencapai nilai maksimum sebesar **194,75°C pada pukul 19.07**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar **182,25°C**, sedangkan Suhu 2 sebesar **207,25°C**. Selisih temperatur antara kedua titik pengukuran mencapai **25,00°C**. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa distribusi panas di dalam pasir belum sepenuhnya seragam. Hal ini dapat dipengaruhi oleh posisi thermocouple terhadap elemen pemanas, jarak sensor dari dinding tabung, kepadatan pasir, dan karakteristik perpindahan panas di dalam media penyimpanan.

Setelah proses pemanasan berakhir, temperatur rata-rata pasir kembali menurun akibat pelepasan panas menuju lingkungan. Pada 17 Juli 2026, temperatur

rata-rata terendah pada pagi hari tercatat sebesar **86,63°C pada pukul 09.01**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 sebesar **83,25°C** dan Suhu 2 sebesar **90,00°C**, sehingga terdapat selisih sebesar **6,75°C** antara kedua titik pengukuran. Nilai temperatur pagi hari yang masih jauh di atas temperatur lingkungan menunjukkan bahwa sebagian energi termal dari siklus pemanasan sebelumnya masih tersimpan di dalam pasir.

Setelah panel surya kembali menghasilkan daya, temperatur pasir pada 17 Juli 2026 mengalami peningkatan. Temperatur rata-rata maksimum kembali mencapai **194,75°C pada pukul 17.18**. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar **182,25°C**, sedangkan Suhu 2 sebesar **207,25°C**, sehingga selisih temperaturnya kembali mencapai **25,00°C**. Suhu 1 secara individual mencapai nilai maksimum sebesar **215,25°C pada pukul 15.48**, sedangkan Suhu 2 mencapai nilai maksimum sebesar **208,25°C pada pukul 17.23**. Perbedaan waktu pencapaian maksimum kedua sensor menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pada setiap titik tidak berlangsung secara bersamaan.

Temperatur rata-rata maksimum pada ketiga siklus pengujian masing-masing sebesar **195,13°C pada 15 Juli**, **194,75°C pada 16 Juli**, dan **194,75°C pada 17 Juli 2026**. Berdasarkan ketiga nilai tersebut, temperatur maksimum rata-rata selama periode pengujian adalah:

$$\bar{T}_{\text{maks}} = \frac{195,13 + 194,75 + 194,75}{3} = 194,88^{\circ}\text{C}$$

Rentang temperatur maksimum antarsiklus hanya sebesar **0,38°C**, yaitu antara **194,75°C** dan **195,13°C**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mencapai temperatur puncak yang relatif serupa pada ketiga siklus pengujian. Namun, kesamaan temperatur maksimum tidak serta-merta menunjukkan bahwa proses pemanasan berlangsung dengan kondisi masukan energi yang sama karena temperatur awal, daya panel, kondisi penyinaran, dan durasi pemanasan dapat berbeda pada setiap siklus.

Data juga memperlihatkan fluktuasi dan perbedaan pembacaan yang cukup besar antara Suhu 1 dan Suhu 2, terutama ketika temperatur pasir telah mencapai nilai tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan adanya gradien temperatur di dalam media pasir. Perbedaannya dapat dipengaruhi oleh posisi sensor, kontak ujung

thermocouple dengan pasir, kepadatan media, jarak sensor terhadap elemen pemanas, serta kehilangan panas melalui dinding dan penutup tabung. Oleh karena itu, temperatur rata-rata kedua thermocouple digunakan untuk mengevaluasi kinerja termal sistem, sedangkan selisih pembacaan kedua sensor digunakan untuk menilai keseragaman distribusi temperatur.

Meskipun demikian, data tanggal 16 dan 17 Juli perlu diperiksa kembali karena beberapa nilai puncaknya identik, yaitu temperatur rata-rata $194,75^{\circ}\text{C}$, Suhu 1 sebesar $182,25^{\circ}\text{C}$, dan Suhu 2 sebesar $207,25^{\circ}\text{C}$. Kesamaan tersebut dapat merupakan hasil pengujian yang valid, tetapi juga perlu dibandingkan dengan data mentah serta waktu pencatatan untuk memastikan tidak terdapat pengulangan atau penyalinan blok data pada proses *logging*.

Selain itu, beberapa perubahan temperatur berlangsung lebih cepat dibandingkan pola termal secara umum. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh posisi thermocouple, kontak ujung sensor dengan pasir, perubahan kepadatan media di sekitar sensor, atau gangguan pembacaan. Oleh karena itu, data temperatur dianalisis menggunakan temperatur rata-rata dari kedua thermocouple, sedangkan perubahan mendadak pada masing-masing sensor digunakan sebagai indikasi adanya ketidakseragaman distribusi temperatur atau ketidakstabilan pembacaan.

Jika dibandingkan dengan konfigurasi pertama, rata-rata temperatur maksimum meningkat dari $99,54^{\circ}\text{C}$ menjadi $194,88^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian, terjadi peningkatan sebesar $95,34^{\circ}\text{C}$ atau $95,78\%$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan dua panel surya dan dua elemen pemanas memberikan kemampuan pemanasan yang lebih besar dibandingkan penggunaan satu panel surya dan satu elemen pemanas.

Meskipun demikian, peningkatan temperatur tidak hanya dipengaruhi oleh penambahan jumlah panel surya dan elemen pemanas. Temperatur awal pasir, kondisi penyinaran matahari, durasi pemanasan, titik awal pencatatan data, dan susunan isolasi termal juga memengaruhi temperatur maksimum yang diperoleh. Oleh karena itu, perbandingan kedua konfigurasi menunjukkan pengaruh gabungan dari peningkatan kapasitas pemanasan dan kondisi pengujian.

Pada konfigurasi kedua, pemasangan isolasi pada bagian penutup belum dilakukan secara menyeluruh. Kondisi tersebut menyebabkan bagian penutup masih berpotensi menjadi jalur kehilangan panas. Pelepasan panas dapat terjadi melalui permukaan penutup, sambungan mekanis, lubang thermocouple, terminal elemen pemanas, serta bagian konstruksi logam yang terhubung dengan lingkungan.

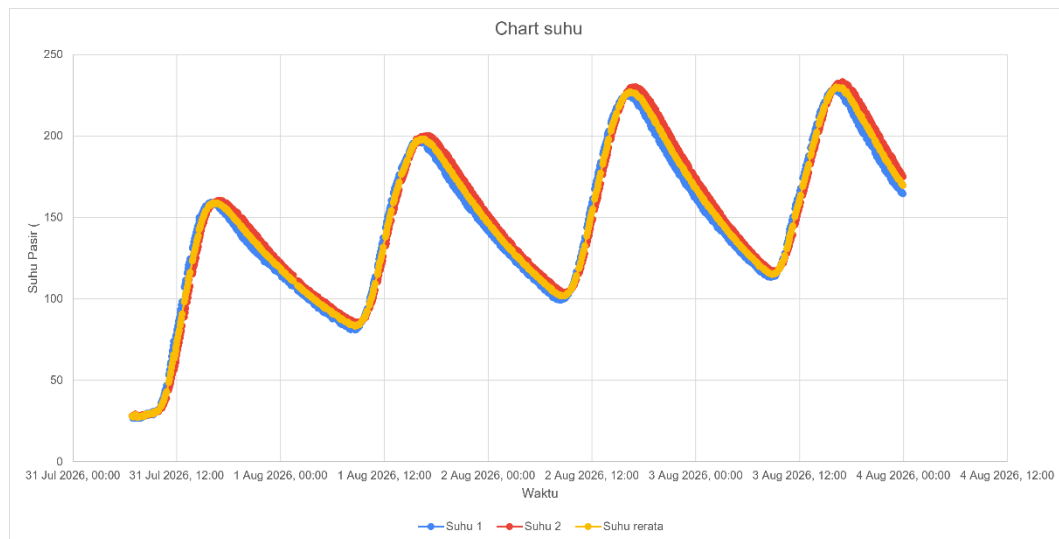
Setelah proses pemanasan berakhir, temperatur rata-rata pasir tetap berada di atas 80°C hingga pagi hari berikutnya. Temperatur terendah pada pagi hari tercatat sebesar 81,38°C pada 16 Juli pukul 08.59, 86,63°C pada 17 Juli pukul 09.01, dan 84,88°C pada 18 Juli pukul 08.23. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian energi termal masih tersimpan di dalam pasir setelah proses pemanasan berhenti, meskipun temperatur terus menurun akibat pelepasan panas menuju lingkungan.

Secara keseluruhan, konfigurasi kedua menghasilkan kinerja pemanasan yang lebih tinggi daripada konfigurasi pertama. Temperatur rata-rata maksimum pada tiga siklus pengujian masing-masing mencapai 195,13°C, 194,75°C, dan 194,75°C, dengan rata-rata sebesar 194,88°C. Namun, perbedaan pembacaan antara Suhu 1 dan Suhu 2 serta perubahan temperatur yang terjadi secara cepat menunjukkan bahwa distribusi panas di dalam pasir belum sepenuhnya seragam. Selain itu, isolasi pada bagian penutup masih perlu disempurnakan untuk mengurangi kehilangan panas selama proses penyimpanan.

5.3.3 Pengujian Periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026

Pengujian periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026 menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Pada konfigurasi ini, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada seluruh sisi tabung, termasuk bagian penutup.

Penyempurnaan isolasi dilakukan untuk mengurangi kehilangan panas dari sisi dan permukaan atas tabung. Konfigurasi ini merupakan konfigurasi isolasi paling lengkap dibandingkan dua pengujian sebelumnya.



Gambar 5. 6 Grafik Kenaikan Suhu Pasir 31 Juli - 3 Agustus

Berdasarkan Gambar 5.6, temperatur pasir mengalami empat siklus pemanasan. Setiap siklus menunjukkan kenaikan temperatur pada siang hari dan penurunan temperatur pada malam hari. Temperatur maksimum meningkat secara bertahap dari siklus pertama hingga siklus keempat.

Pada 31 Juli 2026, pencatatan dimulai pukul 06.50 dengan temperatur rata-rata pasir sebesar 28,00°C. Temperatur sempat menurun menjadi 27,25°C pada pukul 07.28, kemudian meningkat setelah panel surya mulai menyuplai energi menuju elemen pemanas. Temperatur rata-rata maksimum pada hari pertama mencapai 159,13°C pada pukul 16.16. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar 159,00°C dan Suhu 2 sebesar 159,25°C, sehingga selisih pembacaan kedua sensor hanya 0,25°C.

Setelah mencapai temperatur maksimum, temperatur pasir mengalami penurunan secara bertahap akibat berkurangnya daya panel surya dan pelepasan panas menuju lingkungan. Pada 1 Agustus 2026, temperatur rata-rata terendah pada pagi hari tercatat sebesar 83,25°C pada pukul 08.36. Pada waktu tersebut, Suhu 1 sebesar 81,00°C dan Suhu 2 sebesar 85,50°C. Temperatur rata-rata mengalami penurunan sebesar 75,88°C dari temperatur maksimum hari sebelumnya. Meskipun demikian, temperatur tersebut masih lebih tinggi daripada temperatur awal

pengujian, sehingga menunjukkan bahwa sebagian energi termal masih tersimpan di dalam pasir.

Pada 1 Agustus 2026, temperatur pasir kembali meningkat setelah panel surya menyuplai energi listrik menuju elemen pemanas. Temperatur rata-rata meningkat dari $83,25^{\circ}\text{C}$ pada pukul 08.36 menjadi $198,13^{\circ}\text{C}$ pada pukul 16.27. Pada temperatur maksimum tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar $196,50^{\circ}\text{C}$ dan Suhu 2 sebesar $199,75^{\circ}\text{C}$, sehingga selisih kedua titik pengukuran sebesar $3,25^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur rata-rata mencapai $114,88^{\circ}\text{C}$ dalam waktu 7 jam 51 menit, dengan laju pemanasan rata-rata sebesar $14,63^{\circ}\text{C/jam}$.

Setelah siklus pemanasan kedua berakhir, temperatur pasir kembali menurun selama malam hari. Pada 2 Agustus 2026, temperatur rata-rata terendah pada pagi hari tercatat sebesar $101,88^{\circ}\text{C}$ pada pukul 08.23. Pada waktu tersebut, Suhu 1 sebesar $99,25^{\circ}\text{C}$ dan Suhu 2 sebesar $104,50^{\circ}\text{C}$. Temperatur rata-rata mengalami penurunan sebesar $96,25^{\circ}\text{C}$ dari temperatur maksimum hari sebelumnya. Namun, temperatur pagi tersebut masih $18,63^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi daripada temperatur minimum pagi pada 1 Agustus 2026.

Peningkatan temperatur minimum pada pagi hari menunjukkan bahwa pasir belum kembali ke temperatur lingkungan sebelum proses pemanasan berikutnya dimulai. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sebagian energi termal dari siklus sebelumnya masih tersimpan. Namun, temperatur pagi yang lebih tinggi juga dipengaruhi oleh temperatur maksimum sebelumnya, lama pendinginan, kondisi lingkungan, dan kualitas isolasi termal.

Secara keseluruhan, temperatur maksimum meningkat dari $159,13^{\circ}\text{C}$ pada 31 Juli 2026 menjadi $198,13^{\circ}\text{C}$ pada 1 Agustus 2026. Temperatur minimum pagi hari juga meningkat dari $83,25^{\circ}\text{C}$ pada 1 Agustus menjadi $101,88^{\circ}\text{C}$ pada 2 Agustus 2026. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi dua panel surya, dua elemen pemanas, serta isolasi pada seluruh sisi tabung mampu meningkatkan temperatur pasir dan mempertahankan sebagian energi termal hingga siklus pemanasan berikutnya.

Pada 2 Agustus 2026, temperatur rata-rata pasir meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar $227,13^{\circ}\text{C}$ pada pukul 16.25. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar $224,50^{\circ}\text{C}$, sedangkan Suhu 2 sebesar $229,75^{\circ}\text{C}$.

Pada pagi hari tanggal 3 Agustus 2026, temperatur rata-rata terendah tercatat sebesar $115,13^{\circ}\text{C}$ pada pukul 08.51. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar $113,75^{\circ}\text{C}$, sedangkan Suhu 2 sebesar $116,50^{\circ}\text{C}$. Temperatur kemudian kembali meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar $230,13^{\circ}\text{C}$ pada pukul 16.13. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar $229,00^{\circ}\text{C}$, sedangkan Suhu 2 sebesar $231,25^{\circ}\text{C}$.

Temperatur maksimum meningkat dari $159,13^{\circ}\text{C}$ pada siklus pertama menjadi $198,13^{\circ}\text{C}$ pada siklus kedua, sehingga terjadi peningkatan sebesar $39,00^{\circ}\text{C}$. Temperatur maksimum kemudian meningkat sebesar $29,00^{\circ}\text{C}$, yaitu dari $198,13^{\circ}\text{C}$ pada siklus kedua menjadi $227,13^{\circ}\text{C}$ pada siklus ketiga. Selanjutnya, peningkatan dari siklus ketiga menuju siklus keempat sebesar $3,00^{\circ}\text{C}$, yaitu dari $227,13^{\circ}\text{C}$ menjadi $230,13^{\circ}\text{C}$.

Peningkatan temperatur maksimum yang semakin kecil menunjukkan bahwa sistem mulai mendekati kondisi termal berulang. Ketika temperatur pasir meningkat hingga lebih dari 220°C , perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan menjadi semakin besar. Kondisi tersebut meningkatkan laju perpindahan panas menuju lingkungan sehingga kenaikan temperatur maksimum pada siklus berikutnya menjadi lebih kecil.

Temperatur maksimum pada empat siklus pemanasan berturut-turut sebesar $159,13^{\circ}\text{C}$, $198,13^{\circ}\text{C}$, $227,13^{\circ}\text{C}$, dan $230,13^{\circ}\text{C}$. Berdasarkan keempat nilai tersebut, rata-rata temperatur maksimum yang dicapai adalah $203,63^{\circ}\text{C}$. Temperatur maksimum keseluruhan tercatat sebesar $230,13^{\circ}\text{C}$ pada 3 Agustus 2026 pukul 16.13. Pada waktu tersebut, Suhu 1 tercatat sebesar $229,00^{\circ}\text{C}$, sedangkan Suhu 2 sebesar $231,25^{\circ}\text{C}$.

Grafik menunjukkan bahwa Suhu 1 meningkat lebih cepat pada awal proses pemanasan. Menjelang temperatur maksimum, Suhu 1 dan Suhu 2 berada pada nilai yang relatif berdekatan. Setelah temperatur maksimum tercapai, Suhu 1 menurun lebih cepat dan berada di bawah Suhu 2.

Perbedaan ini menunjukkan adanya keterlambatan perpindahan panas antara kedua titik. Titik pengukuran pertama menerima panas lebih cepat, tetapi juga mengalami pelepasan panas lebih cepat. Sementara itu, titik kedua membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai temperatur tinggi, tetapi mampu mempertahankan temperatur lebih lama pada fase pendinginan.

Dibandingkan konfigurasi kedua, pola Suhu 1 dan Suhu 2 pada pengujian ketiga tampak lebih halus dan berdekatan. Hal tersebut menunjukkan bahwa penyebaran panas antara kedua titik pengukuran relatif lebih stabil.

Rockwool dan aluminium foil yang terpasang pada seluruh sisi membantu mengurangi kehilangan panas selama pemanasan. Isolasi pada bagian penutup juga mengurangi perpindahan panas dari permukaan atas menuju lingkungan.

Namun, panas masih dapat keluar melalui sambungan, terminal elemen pemanas, thermocouple, jalur pipa, dan komponen logam. Oleh karena itu, temperatur tetap mengalami penurunan selama periode malam.

Secara keseluruhan, konfigurasi ketiga menghasilkan temperatur tertinggi dan menunjukkan kemampuan retensi panas antarsiklus yang lebih baik. Temperatur rata-rata pasir meningkat dari 28,00°C pada 31 Juli 2026 pukul 06.50 hingga mencapai temperatur maksimum sebesar 230,13°C pada 3 Agustus 2026 pukul 16.13. Dengan demikian, peningkatan temperatur rata-rata selama rangkaian pengujian mencapai 202,13°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan dua panel surya, dua elemen pemanas, serta pemasangan rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi tabung mampu meningkatkan temperatur dan membantu mempertahankan energi termal di dalam pasir silika.

5.3.4 Analisis Perbandingan Hasil Pengujian

Hasil ketiga pengujian menunjukkan adanya peningkatan temperatur pasir setelah konfigurasi sistem dikembangkan. Konfigurasi pertama menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas serta rockwool pada tutup dalamnya menghasilkan temperatur maksimum rata-rata **99,54°C**.

Konfigurasi kedua menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas serta rockwool dan aluminium foil pada sisi samping menghasilkan temperatur maksimum rata-rata **194,88°C**. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan

panel dan elemen pemanas memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan sistem dalam meningkatkan temperatur pasir.

Konfigurasi ketiga menggunakan dua panel surya, dua elemen pemanas, serta rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi. Konfigurasi tersebut menghasilkan temperatur maksimum rata-rata **203,63°C** dengan temperatur tertinggi **230,13°C**.

Jika hanya membandingkan temperatur tertinggi yang dicapai, konfigurasi awal mencapai **103,63°C**, konfigurasi kedua mencapai **195,13°C**, sedangkan konfigurasi ketiga mencapai **230,13°C**.

Peningkatan temperatur tertinggi dari konfigurasi pertama menuju konfigurasi kedua mencapai **91,50°C**. Sementara itu, peningkatan dari konfigurasi kedua menuju konfigurasi ketiga mencapai **35,00°C**.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah panel dan elemen pemanas memberikan perubahan temperatur yang paling besar. Setelah jumlah panel dan elemen pemanas sama, penyempurnaan isolasi pada penutup membantu sistem mencapai dan mempertahankan temperatur yang lebih tinggi.

Namun, hasil pengujian tidak dapat digunakan untuk memisahkan pengaruh setiap perubahan secara mutlak. Ketiga konfigurasi diuji pada waktu yang berbeda dengan kondisi radiasi matahari, temperatur awal, durasi pemanasan, dan temperatur lingkungan yang tidak sepenuhnya sama.

Perbedaan temperatur awal juga memengaruhi temperatur maksimum yang dicapai. Pada pengujian kedua, temperatur awal pencatatan telah mencapai **86,50°C**. Sementara itu, pengujian pertama dimulai pada temperatur **28,00°C**, sedangkan pengujian ketiga dimulai pada temperatur **28,00°C**. Oleh karena itu, penilaian kinerja sistem tidak cukup dilakukan hanya dengan membandingkan temperatur maksimum, tetapi juga perlu mempertimbangkan temperatur awal, kenaikan temperatur, durasi pemanasan, kondisi penyinaran, dan susunan isolasi pada setiap pengujian.

Ketiga grafik juga menunjukkan adanya akumulasi panas antarsiklus. Temperatur minimum pada pagi hari berikutnya selalu lebih tinggi daripada

temperatur awal hari pertama. Kondisi tersebut membuktikan bahwa pasir silika dan isolasi mampu mempertahankan sebagian panas selama periode malam.

Konfigurasi pertama mempertahankan temperatur pagi rata-rata sebesar $41,88^{\circ}\text{C}$. Konfigurasi kedua mempertahankan temperatur pagi rata-rata sebesar $84,29^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, konfigurasi ketiga mempertahankan temperatur pagi rata-rata sebesar $100,09^{\circ}\text{C}$, dengan temperatur minimum pagi yang meningkat pada setiap siklus, yaitu $83,25^{\circ}\text{C}$, $101,88^{\circ}\text{C}$, dan $115,13^{\circ}\text{C}$.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi dua panel dan dua elemen pemanas menghasilkan lebih banyak panas yang dapat disimpan. Pemasangan isolasi pada seluruh sisi juga membantu mengurangi pelepasan panas menuju lingkungan.

Berdasarkan hasil ketiga pengujian, konfigurasi ketiga memberikan kinerja pemanasan terbaik. Konfigurasi tersebut menghasilkan temperatur tertinggi, pola pembacaan sensor yang lebih stabil, dan temperatur awal siklus berikutnya yang terus meningkat.

Dengan demikian, penggunaan dua panel surya, dua elemen pemanas, serta rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi merupakan konfigurasi terbaik dari ketiga pengujian. Sistem mampu meningkatkan temperatur pasir hingga lebih dari 230°C serta mempertahankan sebagian panas hingga proses pemanasan berikutnya dimulai.

Karakteristik penurunan temperatur dan kemampuan pasir dalam mempertahankan panas setelah daya elemen pemanas menurun dibahas lebih lanjut pada Subbab 5.4.

5.4 Pengujian Penyimpanan Panas

Pengujian penyimpanan panas dilakukan untuk mengetahui kemampuan pasir silika dalam mempertahankan temperatur setelah proses pemanasan berakhir. Pengamatan dilakukan dengan melanjutkan pencatatan temperatur dari sore hari hingga pagi hari berikutnya, ketika daya yang diterima elemen pemanas telah menurun hingga mendekati nol.

Temperatur pasir diukur menggunakan dua thermocouple tipe K yang ditempatkan pada dua titik berbeda. Hasil pengukuran ditampilkan sebagai Suhu 1,

Suhu 2, dan suhu rata-rata. Suhu rata-rata digunakan untuk menunjukkan kecenderungan penurunan temperatur pasir secara umum, sedangkan Suhu 1 dan Suhu 2 digunakan untuk mengamati perbedaan pelepasan panas pada kedua titik pengukuran.

Pengujian penyimpanan panas dilakukan menggunakan tiga konfigurasi. Konfigurasi pertama menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas dengan gasket serta rockwool pada bagian penutup. Konfigurasi kedua menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada sisi tabung, tetapi aluminium foil belum dipasang pada bagian penutup. Konfigurasi ketiga menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup.

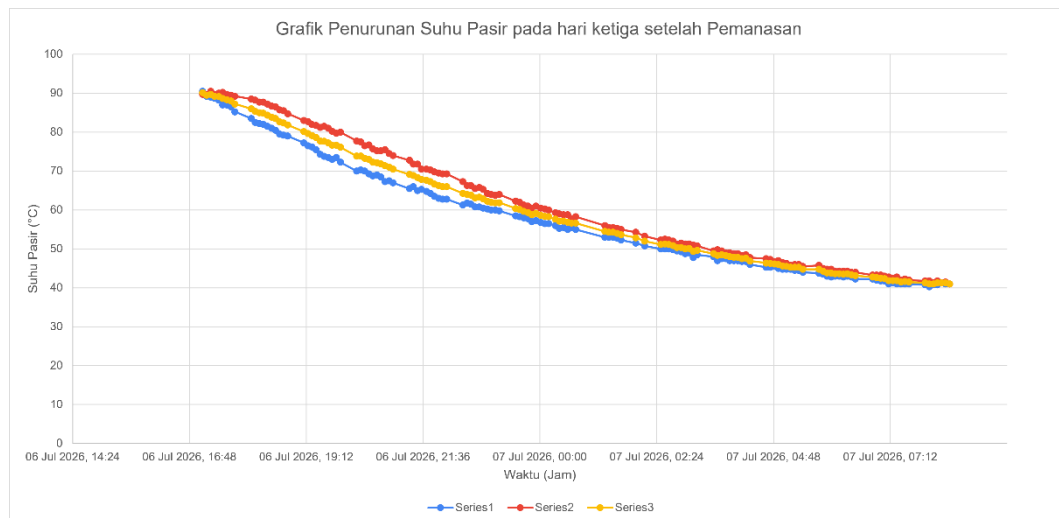
5.4.1 Pengujian Penyimpanan Panas Periode 6 sampai 8 Juli 2026

Pengujian periode 6 sampai 8 Juli 2026 menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas. Bagian penutup tabung dilengkapi gasket dan rockwool untuk mengurangi kehilangan panas melalui celah sambungan dan permukaan atas tabung.

Data penyimpanan panas pada konfigurasi pertama diperoleh dari dua siklus pendinginan lengkap. Siklus pertama berlangsung dari sore hari tanggal 6 Juli sampai pagi hari tanggal 7 Juli 2026. Siklus kedua berlangsung dari sore hari tanggal 7 Juli sampai pagi hari tanggal 8 Juli 2026.

5.4.1.1 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Pengamatan hari pertama dilakukan setelah temperatur pasir mencapai nilai maksimum pada sore hari tanggal 6 Juli 2026. Setelah radiasi matahari menurun, daya yang diterima elemen pemanas ikut berkurang sehingga temperatur pasir mulai mengalami penurunan.



Gambar 5. 7 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Berdasarkan Gambar 5.7, temperatur rata-rata pasir pada awal pendinginan sebesar 91,63°C pada 6 Juli 2026 pukul 16.18. Temperatur tersebut kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai 41,00°C pada 7 Juli 2026 pukul 08.00.

Pada awal pendinginan, Suhu 1 dan Suhu 2 berada pada nilai yang relatif berdekatan. Setelah pendinginan berlangsung, Suhu 1 mengalami penurunan lebih cepat dibandingkan Suhu 2. Kondisi tersebut terlihat dari garis Suhu 1 yang berada di bawah Suhu 2 pada sebagian besar periode malam.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pelepasan panas pada kedua titik pengukuran tidak berlangsung dengan laju yang sama. Titik Suhu 1 kemungkinan berada lebih dekat dengan dinding tabung atau jalur kehilangan panas, sedangkan titik Suhu 2 mampu mempertahankan temperatur sedikit lebih tinggi.

Temperatur rata-rata maksimum sebelum pendinginan tercatat sebesar 91,63°C, kemudian menurun menjadi 41°C setelah sekitar 15 jam 42 menit. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 91,63 - 41,00$$

$$\Delta T = 50,63^{\circ}\text{C}$$

Laju penurunan temperatur rata-rata selama periode tersebut dihitung sebagai berikut:

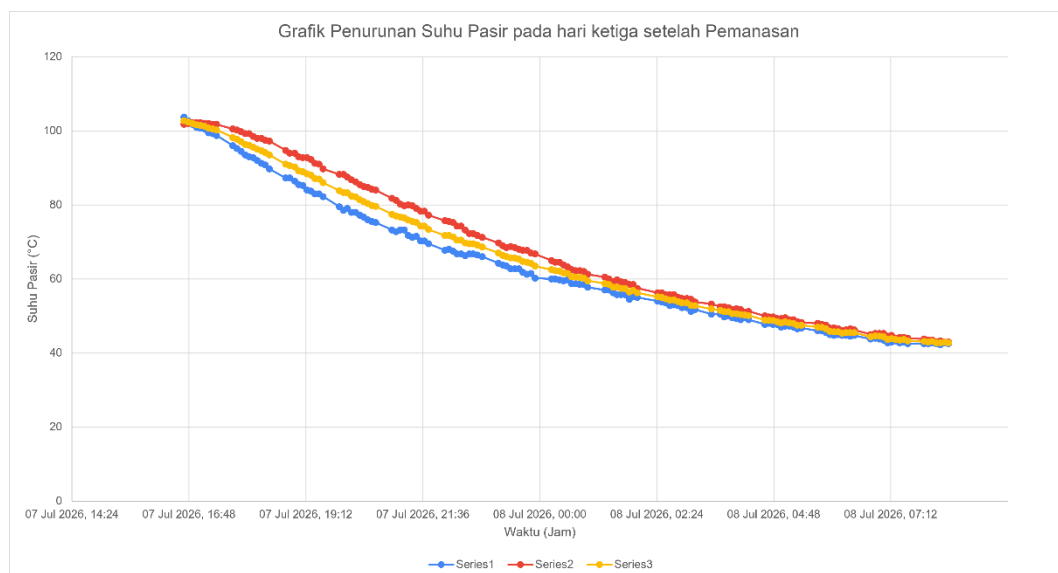
$$r_c = \frac{50,63}{15,70}$$

$$r_c = 3,23^\circ\text{C/jam}$$

Walaupun temperatur mengalami penurunan sebesar $50,63^\circ\text{C}$, temperatur pada pagi hari masih berada sekitar 13°C di atas temperatur awal pengujian yang berkisar 28°C . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian panas masih tersimpan di dalam pasir silika.

5.4.1.2 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Pengamatan hari kedua dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 7 Juli 2026. Temperatur awal pendinginan pada siklus kedua lebih tinggi dibandingkan siklus pertama karena sistem telah mengalami proses pemanasan sebelumnya.



Gambar 5. 8 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Berdasarkan Gambar 5.8, temperatur rata-rata pada awal pendinginan tercatat sebesar $103,38^\circ\text{C}$ pada 7 Juli 2026 pukul 16.12. Temperatur tersebut kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai $42,75^\circ\text{C}$ pada 8 Juli 2026 pukul 08.08.

Suhu 1 pada awal pendinginan berada sedikit lebih tinggi dibandingkan Suhu 2. Namun, Suhu 1 kemudian mengalami penurunan lebih cepat. Setelah beberapa waktu, garis Suhu 1 berada di bawah Suhu 2 hingga akhir periode pendinginan.

Temperatur rata-rata maksimum sebelum pendinginan tercatat sebesar 103,38°C. Setelah mengalami pendinginan selama sekitar 15 jam 56 menit, temperatur rata-rata menurun menjadi 42,75°C. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 103,38 - 42,75$$

$$\Delta T = 60,63^\circ\text{C}$$

Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

$$r_c = \frac{60,63}{15,93}$$

$$r_c = 3,81^\circ\text{C/jam}$$

Hasil kedua siklus menunjukkan bahwa konfigurasi satu panel dan satu elemen pemanas mampu mempertahankan temperatur pasir pada kisaran 41 sampai 43°C hingga pagi hari berikutnya. Akan tetapi, panas yang dilepaskan masih cukup besar karena konfigurasi isolasi belum menutupi seluruh sisi konstruksi.

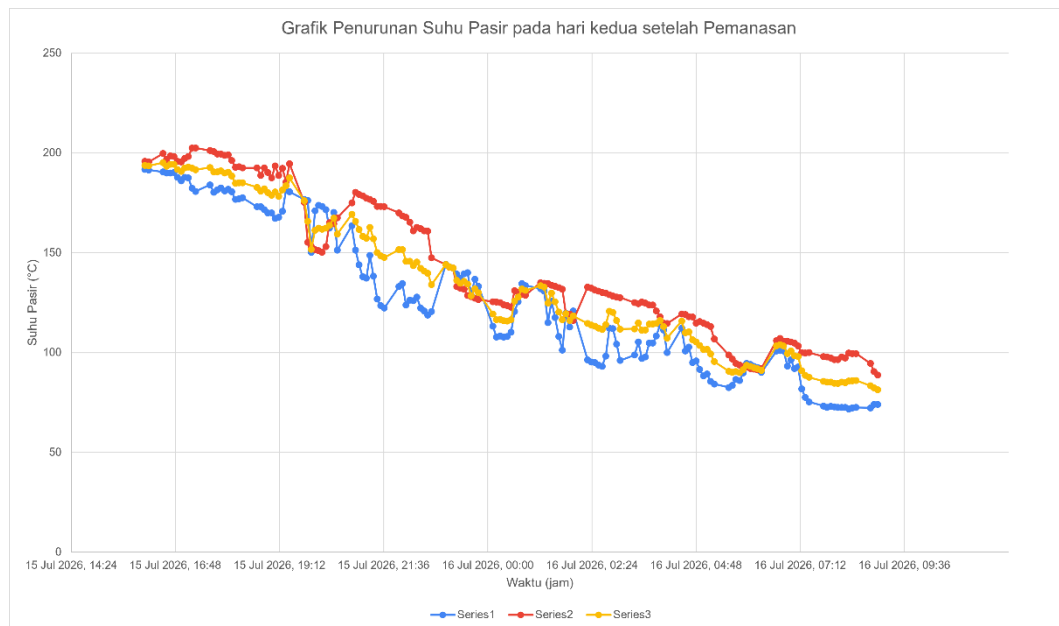
5.4.2 Pengujian Penyimpanan Panas Periode 15 sampai 18 Juli 2026

Pengujian periode 15 sampai 18 Juli 2026 menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada sisi tabung, tetapi aluminium foil belum dipasang pada bagian penutup.

Data penyimpanan panas pada konfigurasi ini terdiri atas tiga siklus pendinginan lengkap, yaitu periode 15 sampai 16 Juli, 16 sampai 17 Juli, dan 17 sampai 18 Juli 2026.

5.4.2.1 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Pengamatan hari pertama dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 15 Juli 2026. Temperatur rata-rata pasir pada awal pendinginan berada pada kisaran 193 sampai 195°C.



Gambar 5. 9 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Berdasarkan Gambar 5.9, ketiga kurva memperlihatkan kecenderungan menurun selama periode malam. Suhu 2 berada di atas Suhu 1 pada sebagian besar periode pendinginan, sedangkan suhu rata-rata berada di antara kedua titik pengukuran.

Suhu 1 memperlihatkan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan Suhu 2. Beberapa perubahan terjadi dalam waktu relatif singkat. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh posisi sensor, kontak antara thermocouple dan pasir, serta kestabilan sistem pengukuran.

Temperatur rata-rata maksimum sebesar $195,13^{\circ}\text{C}$ menurun menjadi $81,38^{\circ}\text{C}$ pada 16 Juli 2026 pukul 08.59. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 195,13 - 81,38 = 113,75^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama 16 jam 28 menit atau 16,47 jam. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

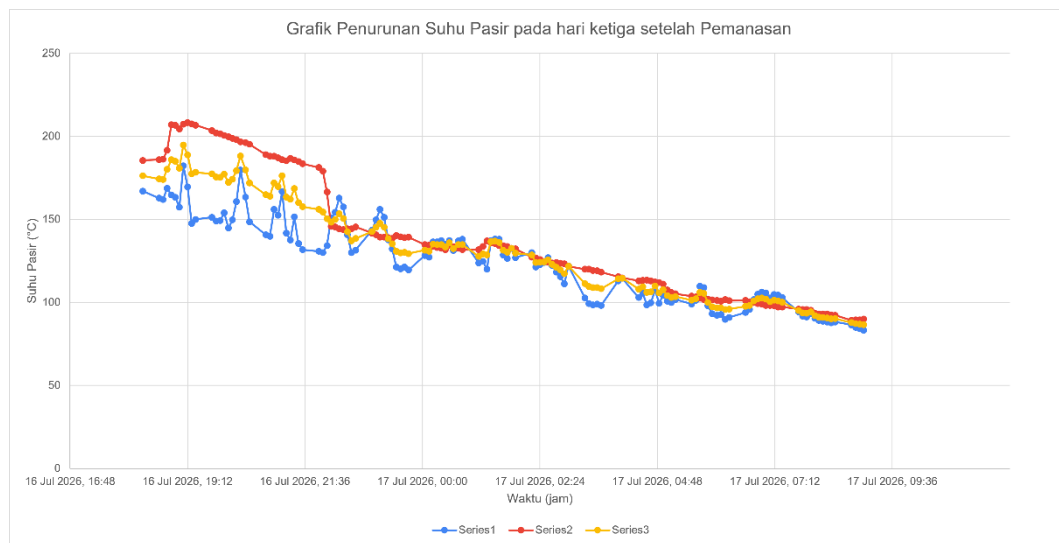
$$r_{\text{pendinginan}} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$r_{\text{pendinginan}} = \frac{113,75}{16,47} = 6,91^{\circ}\text{C/jam}$$

Walaupun temperatur menurun sebesar $113,75^{\circ}\text{C}$, temperatur pasir pada pagi hari masih mencapai $81,38^{\circ}\text{C}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian energi termal tetap tersimpan selama periode malam.

5.4.2.2 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Pengamatan hari kedua dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 16 Juli 2026. Temperatur awal pendinginan kembali berada pada kisaran 190 sampai 195°C .



Gambar 5. 10 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Berdasarkan Gambar 5.10, Suhu 2 pada awal pendinginan memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan Suhu 1. Suhu 2 sempat berada di atas 200°C , sedangkan Suhu 1 menunjukkan fluktuasi pada kisaran yang lebih rendah.

Setelah melewati beberapa jam awal, fluktuasi kedua sensor mulai berkurang dan pola penurunan temperatur menjadi lebih teratur. Temperatur rata-rata kemudian menurun hingga mencapai **$86,63^{\circ}\text{C}$ pada 17 Juli 2026 pukul 09.01**. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 194,75 - 86,63 = 108,12^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama **13 jam 54 menit** atau **13,90 jam**. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

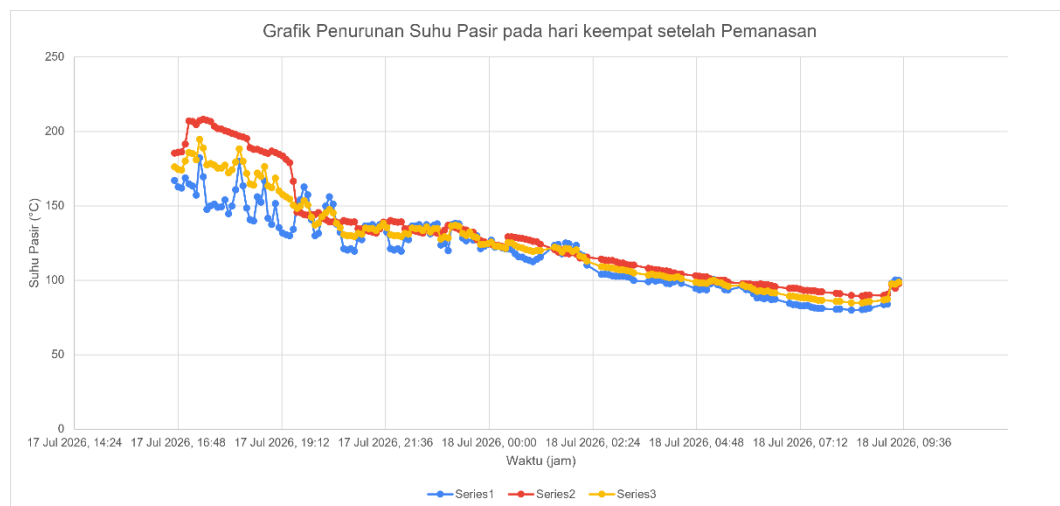
$$r_{\text{pendinginan}} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$r_{\text{pendinginan}} = \frac{108,12}{13,90} = 7,78^{\circ}\text{C/jam}$$

Perbedaan Suhu 1 dan Suhu 2 yang cukup besar pada beberapa bagian menunjukkan bahwa pelepasan panas belum berlangsung secara seragam. Namun, temperatur rata-rata tetap memperlihatkan kecenderungan penurunan dari sore hingga pagi hari.

5.4.2.3 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Ketiga

Pengamatan hari ketiga dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 17 Juli 2026. Temperatur rata-rata pada awal pendinginan berada pada kisaran 190 sampai 195°C.



Gambar 5. 11 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Ketiga

Berdasarkan Gambar 5.11, pola penurunan temperatur hari ketiga hampir sama dengan hari kedua. Suhu 2 mempertahankan nilai yang lebih tinggi dibandingkan Suhu 1 pada sebagian besar waktu pengamatan.

Pada awal pendinginan masih terlihat fluktuasi, khususnya pada Suhu 1. Setelah beberapa jam, ketiga kurva menunjukkan kecenderungan penurunan yang lebih teratur.

Temperatur rata-rata menurun dari 194,75°C menjadi 84,88°C pada pagi hari tanggal 18 Juli 2026. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 194,75 - 84,88$$

$$\Delta T = 109,87^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama 15 jam 5 menit. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

$$r_c = \frac{109,87}{15,08}$$

$$r_c = 7,29^\circ\text{C/jam}$$

Menjelang akhir pengamatan, suhu mulai mengalami sedikit peningkatan. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa panel surya mulai kembali menghasilkan daya pada pagi hari. Oleh karena itu, data setelah temperatur mulai meningkat tidak dimasukkan sebagai bagian dari pendinginan alami.

Berdasarkan ketiga siklus, penurunan temperatur rata-rata konfigurasi kedua adalah:

$$\Delta T_{\text{rata-rata}} = \frac{113,75 + 108,12 + 109,87}{3} \Delta T_{\text{rata-rata}} = 110,58^\circ\text{C}$$

Laju penurunan temperatur rata-rata untuk ketiga siklus adalah:

$$r_{c,\text{rata-rata}} = \frac{6,91 + 7,78 + 7,29}{3}$$

$$r_{c,\text{rata-rata}} = 7,33^\circ\text{C/jam}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi kedua mampu mempertahankan temperatur pasir pada 81 sampai 87°C hingga pagi hari berikutnya.

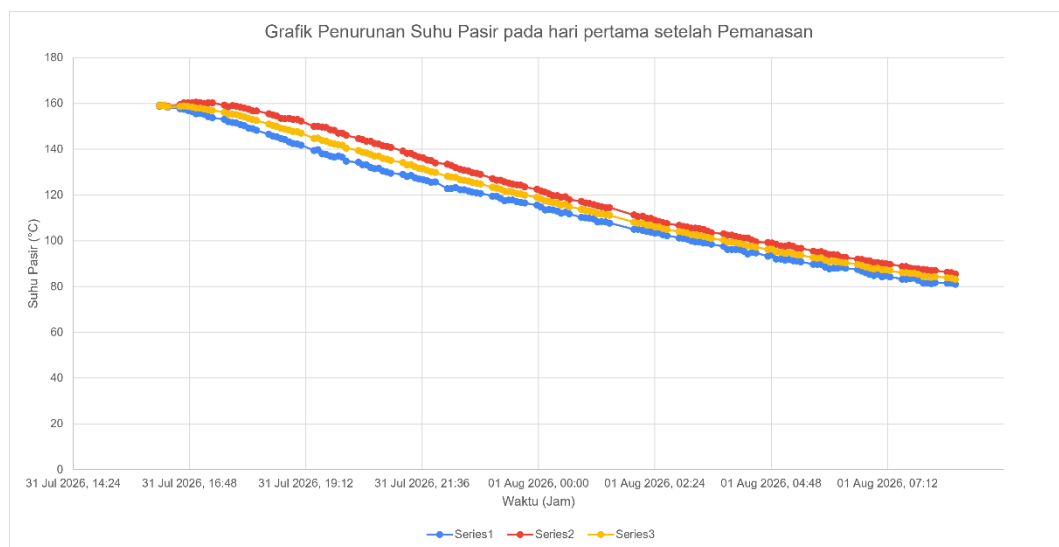
5.4.3 Pengujian Penyimpanan Panas Periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026

Pengujian periode 31 Juli sampai 3 Agustus 2026 menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas. Pada konfigurasi ini, rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada seluruh sisi tabung, termasuk bagian penutup.

Konfigurasi ini memiliki tiga siklus pendinginan lengkap dan satu siklus pendinginan parsial. Siklus lengkap berlangsung pada periode 31 Juli sampai 1 Agustus, 1 sampai 2 Agustus, serta 2 sampai 3 Agustus. Siklus 3 Agustus hanya tercatat sampai sekitar tengah malam sehingga tidak digunakan dalam perhitungan rata-rata pendinginan satu malam.

5.4.3.1 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Pengamatan hari pertama dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 31 Juli 2026 Temperatur rata-rata pasir sebelum pendinginan berada pada kisaran 159°C.



Gambar 5. 12 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Pertama

Berdasarkan Gambar 5.12, ketiga kurva menunjukkan pola penurunan yang relatif stabil. Suhu 2 berada sedikit lebih tinggi daripada Suhu 1, sedangkan suhu rata-rata berada di antara kedua titik tersebut.

Temperatur rata-rata menurun dari 159,13°C menjadi 83,25°C pada pagi hari tanggal 1 Agustus 2026. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 159,13 - 83,25$$

$$\Delta T = 75,88^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama sekitar 16 jam 20 menit. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

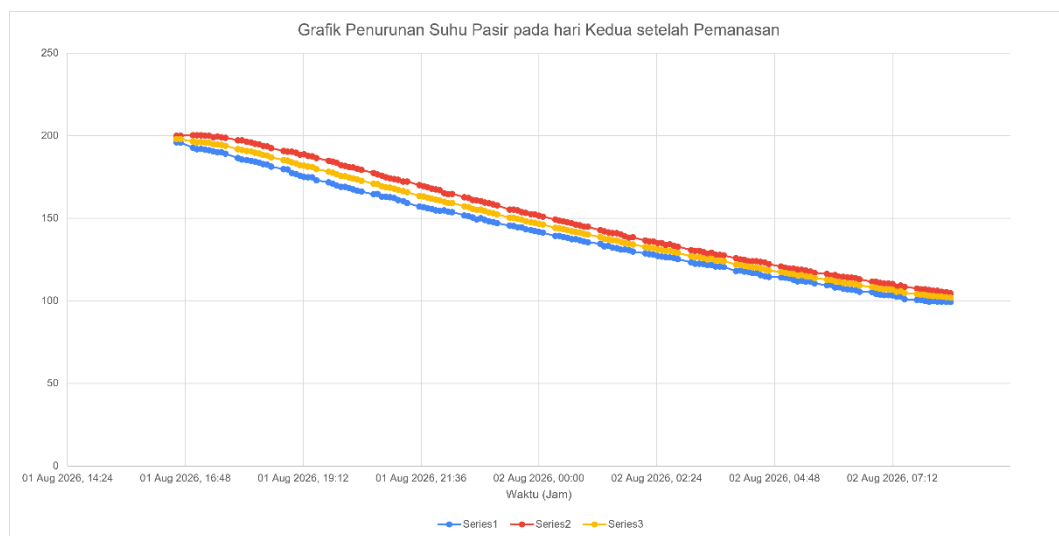
$$r_c = \frac{75,88}{16,33}$$

$$r_c = 4,65^{\circ}\text{C/jam}$$

Pola kurva yang relatif halus menunjukkan bahwa pelepasan panas berlangsung secara bertahap. Tidak terdapat fluktuasi besar seperti pada konfigurasi periode 15 sampai 18 Juli 2026.

5.4.3.2 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Pengamatan hari kedua dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 1 Agustus 2026 dengan temperatur rata-rata awal pendinginan telah meningkat menjadi 198°C seperti yang terlihat pada Gambar 5.13.



Gambar 5. 13 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Kedua

Temperatur rata-rata menurun dari 198,13°C menjadi 101,88°C pada pagi hari tanggal 2 Agustus 2026. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 198,13 - 101,88$$

$$\Delta T = 96,25^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama sekitar 15 jam 56 menit. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

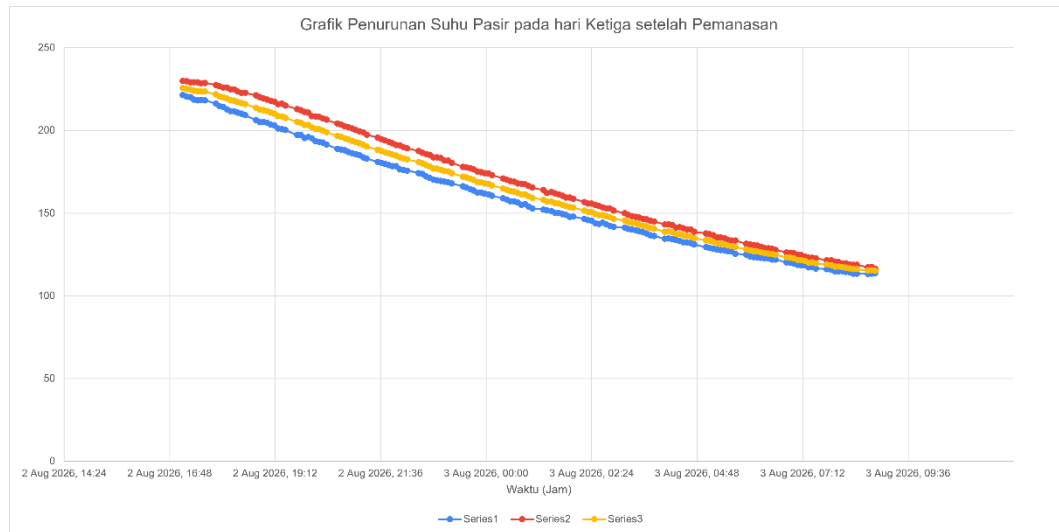
$$r_c = \frac{96,25}{15,93}$$

$$r_c = 6,04^{\circ}\text{C/jam}$$

Walaupun mengalami penurunan 96°C, temperatur pasir pada pagi hari tetap berada di atas 100°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem masih mempertahankan panas dalam jumlah yang cukup besar.

5.4.3.3 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Ketiga

Pengamatan hari ketiga dilakukan setelah pemanasan tanggal 2 Agustus 2026 dengan temperatur rata-rata pada awal pendinginan mencapai 227°C seperti yang terlihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5. 14 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Ketiga

Temperatur rata-rata menurun dari 227,13°C menjadi 115,13°C pada pagi hari tanggal 3 Agustus 2026. Penurunan temperatur yang terjadi adalah:

$$\Delta T = 227,13 - 115,13$$

$$\Delta T = 112^{\circ}\text{C}$$

Pendinginan berlangsung selama sekitar 16 jam 26 menit. Laju penurunan temperatur rata-ratanya adalah:

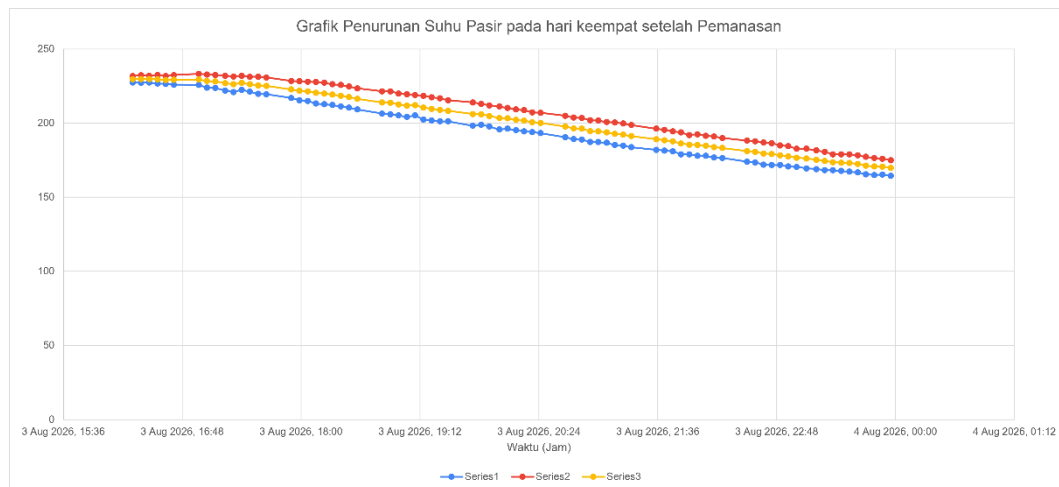
$$r_c = \frac{112}{16,43}$$

$$r_c = 6,82^{\circ}\text{C/jam}$$

Walaupun temperatur mengalami penurunan sebesar 112°C, temperatur pasir masih berada di atas 115°C pada pagi hari berikutnya. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi panas dari beberapa siklus pemanasan.

5.4.3.4 Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Keempat

Pengamatan hari keempat dilakukan setelah proses pemanasan tanggal 3 Agustus 2026. Temperatur rata-rata pada awal pendinginan berada pada 230°C.



Gambar 5. 15 Grafik Penurunan Temperatur Setelah Pemanasan Hari Keempat

Berdasarkan Gambar 5.15, temperatur menurun dari sekitar 230°C menjadi sekitar 169,75°C hingga mendekati pukul 23.57. Ketiga kurva menunjukkan pola penurunan yang relatif stabil dan tidak mengalami fluktuasi besar.

Suhu 2 berada pada nilai tertinggi, sedangkan Suhu 1 berada pada nilai terendah. Suhu rata-rata tetap berada di antara kedua hasil pengukuran.

Grafik hari keempat hanya menunjukkan proses pendinginan hingga sekitar tengah malam. Dengan demikian, data tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan ketiga grafik sebelumnya yang mencakup pendinginan hingga pagi hari. Data hari keempat hanya digunakan untuk menunjukkan kecenderungan awal penurunan temperatur.

Berdasarkan tiga siklus lengkap, penurunan temperatur rata-rata konfigurasi ketiga adalah:

$$\Delta T_{\text{rata-rata}} = \frac{75,88 + 96,25 + 112,00}{3}$$

$$\Delta T_{\text{rata-rata}} = 94,71^{\circ}\text{C}$$

Temperatur rata-rata pada awal pendinginan adalah:

$$T_{\text{awal,rata-rata}} = \frac{159,13 + 198,13 + 227,13}{3}$$

$$T_{\text{awal,rata-rata}} = 194,80^{\circ}\text{C}$$

Temperatur rata-rata yang masih dipertahankan hingga pagi hari adalah:

$$T_{\text{akhir,rata-rata}} = \frac{83,25 + 101,88 + 115,13}{3}$$

$$T_{\text{akhir,rata-rata}} = 100,09^{\circ}\text{C}$$

Laju penurunan temperatur rata-rata konfigurasi ketiga adalah:

$$r_{c,\text{rata-rata}} = \frac{4,65 + 6,04 + 6,82}{3}$$

$$r_{c,\text{rata-rata}} = 5,84^{\circ}\text{C/jam}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi ketiga mampu mempertahankan temperatur rata-rata sekitar 100°C hingga pagi hari berikutnya.

5.4.4 Analisis Hasil Pengujian Penyimpanan Panas

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, pasir silika mampu mempertahankan sebagian energi termal setelah daya yang diterima elemen pemanas menurun hingga mendekati nol. Kemampuan penyimpanan tersebut terlihat dari temperatur pasir pada pagi hari yang masih lebih tinggi daripada temperatur lingkungan. Namun, kemampuan mempertahankan temperatur berbeda pada setiap konfigurasi karena dipengaruhi oleh temperatur awal pendinginan, jumlah energi yang tersimpan, serta susunan isolasi termal.

Pada konfigurasi pertama yang menggunakan satu panel surya, satu elemen pemanas, gasket, dan rockwool pada bagian penutup, temperatur rata-rata pasir pada awal pendinginan berada pada $91,63$ sampai $103,38^{\circ}\text{C}$. Setelah mengalami pendinginan selama kurang lebih 16 jam, temperatur rata-rata pasir masih berada pada $41,00$ sampai $42,75^{\circ}\text{C}$. Penurunan temperatur pada kedua siklus mencapai $50,63^{\circ}\text{C}$ dan $60,63^{\circ}\text{C}$, dengan laju pendinginan masing-masing sebesar $3,23^{\circ}\text{C/jam}$ dan $3,81^{\circ}\text{C/jam}$.

Rata-rata laju pendinginan konfigurasi pertama dapat dihitung sebagai berikut:

$$r_{c1} = \frac{3,23 + 3,81}{2}$$

$$r_{c1} = 3,52^{\circ}\text{C/jam}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi pertama memiliki laju pendinginan rata-rata sebesar $3,52^{\circ}\text{C/jam}$. Meskipun nilainya lebih rendah daripada dua konfigurasi lainnya, hasil ini tidak langsung menunjukkan bahwa konfigurasi

pertama memiliki kemampuan isolasi terbaik. Temperatur awal pendinginan pada konfigurasi pertama jauh lebih rendah sehingga perbedaan temperatur antara pasir dan lingkungan juga lebih kecil. Perbedaan temperatur yang lebih kecil menyebabkan laju pelepasan panas menuju lingkungan berlangsung lebih lambat. Pada konfigurasi kedua yang menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas, temperatur rata-rata awal pendinginan berada pada kisaran 194,75 sampai 195,13°C. Setelah mengalami pendinginan selama kurang lebih 14 sampai 16 jam, temperatur rata-rata pasir masih berada pada kisaran 81,38 sampai 86,63°C.

Penurunan temperatur selama tiga siklus mencapai 113,75°C, 108,12°C, dan 109,87°C. Rata-rata penurunan temperatur konfigurasi kedua dihitung sebagai berikut:

$$\Delta T_2 = \frac{113,75 + 108,12 + 109,87}{3}$$

$$\Delta T_2 = 110,58^\circ\text{C}$$

Laju pendinginan pada ketiga siklus masing-masing sebesar 6,91°C/jam, 7,78°C/jam, dan 7,29°C/jam. Dengan demikian, laju pendinginan rata-rata konfigurasi kedua adalah:

$$r_{c2} = \frac{6,91 + 7,78 + 7,29}{3}$$

$$r_{c2} = 7,33^\circ\text{C/jam}$$

Konfigurasi kedua menghasilkan laju pendinginan rata-rata tertinggi. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh temperatur awal pendinginan yang mencapai sekitar 195°C sehingga terdapat perbedaan temperatur yang besar antara pasir silika dan lingkungan. Semakin besar perbedaan temperatur tersebut, semakin besar kecenderungan panas berpindah keluar dari sistem.

Selain temperatur awal yang tinggi, bagian penutup pada konfigurasi kedua belum dilengkapi rockwool dan aluminium foil secara menyeluruh. Bagian atas tabung berpotensi menjadi salah satu jalur utama kehilangan panas. Panas juga dapat berpindah melalui terminal elemen pemanas, lubang thermocouple, sambungan pipa, baut pengikat, dan celah antara penutup dengan badan tabung.

Meskipun memiliki laju pendinginan tertinggi, konfigurasi kedua mampu mempertahankan temperatur pasir di atas 80°C hingga pagi hari. Temperatur

tersebut lebih tinggi daripada temperatur akhir konfigurasi pertama. Hasil ini terjadi karena jumlah energi termal yang tersimpan sebelum pendinginan juga lebih besar akibat penggunaan dua panel surya dan dua elemen pemanas.

Pada konfigurasi ketiga, sistem menggunakan dua panel surya, dua elemen pemanas, serta rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup. Berdasarkan tiga siklus pendinginan lengkap, temperatur rata-rata pada awal pendinginan mencapai 159,13°C, 198,13°C, dan 227,13°C. Temperatur rata-rata pada pagi hari berikutnya masing-masing masih mencapai 83,25°C, 101,88°C, dan 115,13°C.

Temperatur awal pendinginan rata-rata pada konfigurasi ketiga adalah:

$$T_{awal,3} = \frac{159,13 + 198,13 + 227,13}{3}$$

$$T_{awal,3} = 194,80^{\circ}\text{C}$$

Sementara itu, temperatur akhir rata-rata yang masih dipertahankan hingga pagi hari adalah:

$$T_{akhir,3} = \frac{83,25 + 101,88 + 115,13}{3}$$

$$T_{akhir,3} = 100,09^{\circ}\text{C}$$

Penurunan temperatur pada ketiga siklus tersebut masing-masing mencapai 75,88°C, 96,25°C, dan 112,00°C. Rata-rata penurunan temperatur konfigurasi ketiga adalah:

$$\Delta T_3 = \frac{75,88 + 96,25 + 112,00}{3}$$

$$\Delta T_3 = 94,71^{\circ}\text{C}$$

Laju pendinginan masing-masing siklus tercatat sebesar 4,65°C/jam, 6,04°C/jam, dan 6,82°C/jam. Dengan demikian, laju pendinginan rata-rata konfigurasi ketiga adalah:

$$r_{c3} = \frac{4,65 + 6,04 + 6,82}{3}$$

$$r_{c3} = 5,84^{\circ}\text{C/jam}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa laju pendinginan konfigurasi ketiga lebih rendah daripada konfigurasi kedua, meskipun temperatur awal pendinginan

rata-rata keduanya hampir sama. Temperatur awal pendinginan rata-rata konfigurasi kedua berada di sekitar 194,88°C, sedangkan konfigurasi ketiga sebesar 194,80°C. Kesamaan temperatur awal tersebut membuat perbandingan kedua konfigurasi menjadi lebih relevan.

Pada konfigurasi kedua, temperatur mengalami penurunan rata-rata sebesar 110,58°C dengan laju pendinginan sebesar 7,33°C/jam. Pada konfigurasi ketiga, temperatur mengalami penurunan rata-rata sebesar 94,71°C dengan laju pendinginan sebesar 5,84°C/jam. Dengan demikian, pemasangan isolasi pada bagian penutup menghasilkan penurunan laju pendinginan sebesar:

$$\Delta r_c = 7,33 - 5,84$$

$$\Delta r_c = 1,49^\circ\text{C/jam}$$

Persentase penurunan laju pendinginan dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_{r_c} = \frac{7,33 - 5,84}{7,33} \times 100\%$$

$$R_{r_c} = 20,33\%$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, laju pendinginan pada konfigurasi ketiga sekitar 20,33% lebih rendah daripada konfigurasi kedua. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan rockwool dan aluminium foil pada bagian penutup membantu memperlambat pelepasan panas dari sistem.

Perbandingan hasil ketiga konfigurasi dapat dirangkum dalam Tabel 5.1.

Tabel 5 - 1 Perbandingan Hasil Pengujian Penyimpanan Panas

Parameter	Konfigurasi 1	Konfigurasi 2	Konfigurasi 3
Jumlah panel surya	1 unit	2 unit	2 unit
Jumlah elemen pemanas	1 unit	2 unit	2 unit
Kondisi isolasi	Gasket dan rockwool pada penutup	Rockwool dan aluminium foil pada sisi tabung	Rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi
Jumlah siklus lengkap	2 siklus	3 siklus	3 siklus

Parameter	Konfigurasi 1	Konfigurasi 2	Konfigurasi 3
Temperatur akhir pagi hari	41,00–42,75°C	81,38–86,63°C	83,25–115,13°C
Temperatur akhir rata-rata	41,88°C	84,29°C	100,09°C
Penurunan temperatur rata-rata	55,63°C	110,58°C	94,71°C
Laju pendinginan rata-rata	3,52°C/jam	7,33°C/jam	5,84°C/jam

Tabel 5.1 menunjukkan bahwa konfigurasi pertama memiliki laju pendinginan paling rendah, tetapi temperatur awal dan jumlah energi termal yang tersimpan juga paling rendah. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak dapat digunakan secara langsung untuk menyatakan bahwa konfigurasi pertama memiliki kemampuan penyimpanan terbaik.

Konfigurasi kedua menghasilkan temperatur awal pendinginan yang jauh lebih tinggi daripada konfigurasi pertama, tetapi bagian penutup belum memperoleh isolasi secara menyeluruh. Kondisi tersebut menyebabkan panas lebih mudah berpindah melalui bagian atas tabung. Akibatnya, konfigurasi kedua memiliki laju pendinginan rata-rata tertinggi.

Konfigurasi ketiga memiliki temperatur awal pendinginan yang hampir sama dengan konfigurasi kedua, tetapi menghasilkan laju pendinginan yang lebih rendah dan temperatur akhir yang lebih tinggi. Temperatur rata-rata yang masih dipertahankan hingga pagi hari mencapai 100,09°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi ketiga memiliki kemampuan mempertahankan panas yang paling baik di antara konfigurasi yang diuji.

Selain nilai temperatur akhir, bentuk kurva pendinginan konfigurasi ketiga juga terlihat lebih halus dan stabil. Sebaliknya, konfigurasi kedua memperlihatkan fluktuasi yang lebih besar, khususnya pada Suhu 1. Perbedaan tersebut dapat

dipengaruhi oleh posisi thermocouple, kontak sensor dengan pasir, distribusi panas yang belum seragam, dan kestabilan sistem pengukuran.

Pada seluruh konfigurasi, laju penurunan temperatur tidak berlangsung secara konstan. Temperatur cenderung menurun lebih cepat pada beberapa jam awal setelah pemanasan berakhir. Setelah temperatur pasir semakin rendah, kurva pendinginan menjadi lebih landai.

Pola tersebut terjadi karena laju perpindahan panas dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan. Ketika temperatur pasir masih tinggi, perbedaan temperatur terhadap lingkungan juga besar sehingga panas berpindah lebih cepat. Ketika temperatur pasir semakin mendekati temperatur lingkungan, laju perpindahan panas ikut berkurang.

Meskipun telah menggunakan rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi, kehilangan panas belum dapat dihilangkan sepenuhnya. Panas masih dapat berpindah melalui konduksi pada dinding tabung, sambungan logam, baut, terminal elemen pemanas, thermocouple, dan jalur pipa. Selain itu, panas dapat dilepaskan melalui konveksi dari permukaan luar menuju udara serta radiasi termal menuju lingkungan.

Perbedaan pembacaan Suhu 1 dan Suhu 2 menunjukkan bahwa distribusi serta pelepasan panas di dalam media pasir belum sepenuhnya seragam. Suhu 1 pada beberapa siklus mengalami penurunan lebih cepat, sedangkan Suhu 2 mampu mempertahankan temperatur yang lebih tinggi. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan posisi sensor terhadap elemen pemanas, *coil* tembaga, dinding tabung, dan jalur kehilangan panas.

Penggunaan dua thermocouple hanya menggambarkan kondisi termal pada dua titik pengukuran. Oleh karena itu, temperatur rata-rata kedua sensor belum sepenuhnya mewakili distribusi temperatur seluruh volume pasir. Penambahan sensor pada beberapa posisi dan kedalaman dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai distribusi panas di dalam tabung.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa pasir silika mampu menyimpan energi termal dan melepaskannya secara bertahap setelah keluaran daya panel surya menurun. Konfigurasi ketiga memberikan hasil

penyimpanan panas terbaik dengan temperatur akhir rata-rata sebesar 100,09°C setelah pendinginan selama kurang lebih 16 jam dan laju pendinginan rata-rata sebesar 5,84°C/jam.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemasangan rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup, berperan dalam memperlambat pelepasan panas menuju lingkungan. Dengan demikian, konfigurasi dua panel surya, dua elemen pemanas, serta isolasi termal pada seluruh sisi merupakan konfigurasi terbaik untuk meningkatkan kemampuan penyimpanan panas prototipe *sand battery*.

5.5 Perhitungan Efisiensi Sistem

Berdasarkan rangkaian pengujian yang telah dilakukan, perhitungan efisiensi sistem digunakan untuk mengetahui perbandingan antara energi listrik yang masuk ke elemen pemanas dengan energi panas yang berhasil disimpan oleh pasir silika. Perhitungan dilakukan menggunakan data pengujian tanggal 3 Agustus 2026 karena data pada tanggal tersebut menunjukkan proses pemanasan yang relatif lengkap dan menghasilkan kenaikan temperatur tertinggi.

Pada pengujian tersebut, temperatur rata-rata pasir meningkat dari 100,25°C menjadi 229,88°C. Dengan demikian, kenaikan temperatur pasir selama proses pemanasan mencapai 129,63°C. Massa pasir silika yang digunakan sebesar 57 kg, sedangkan kapasitas panas spesifik pasir silika ditetapkan sebesar 830 J/kg°C.

Berdasarkan hasil pengolahan data terhadap waktu selama proses pemanasan, energi listrik yang masuk menuju elemen pemanas mencapai sekitar 4.099 Wh. Jika dikonversikan ke dalam satuan joule, energi listrik masukan dihitung sebagai berikut:

$$E_{\text{input}} = 4.099 \times 3.600$$

$$E_{\text{input}} = 14.756.400 \text{ J}$$

Dengan demikian, energi listrik yang diterima oleh elemen pemanas selama periode pengujian mencapai sekitar **14.756.400 J** atau setara dengan **4.099 Wh**. Energi panas yang tersimpan di dalam pasir silika dihitung berdasarkan massa pasir, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur. Persamaan energi panas yang digunakan adalah:

$$Q_{\text{pasir}} = m \times c_p \times \Delta T$$

keterangan:

Q_{pasir} = energi panas yang tersimpan pada pasir (J)

m = massa pasir silika sebesar 57 kg

c_p = kapasitas panas spesifik pasir sebesar 830 J/kg°C

ΔT = kenaikan temperatur pasir sebesar 129,63°C

Kenaikan temperatur pasir diperoleh dari selisih antara temperatur akhir dan temperatur awal:

$$\Delta T = 229,88 - 100,25$$

$$\Delta T = 129,63^\circ\text{C}$$

Dengan demikian, energi panas yang tersimpan pada pasir silika dihitung sebagai berikut:

$$Q_{\text{pasir}} = 57 \times 830 \times 129,63$$

$$Q_{\text{pasir}} = 6.132.559 \text{ J}$$

Energi panas tersebut kemudian dikonversikan ke dalam satuan watt-hour:

$$Q_{\text{pasir}} = \frac{6.132.559}{3.600}$$

$$Q_{\text{pasir}} = 1.703,49 \text{ Wh}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, energi panas yang berhasil tersimpan pada pasir silika selama proses pemanasan mencapai sekitar **6.132.559 J** atau setara dengan **1.703,49 Wh**.

Efisiensi penyimpanan panas dihitung dengan membandingkan energi panas yang tersimpan pada pasir terhadap energi listrik yang masuk menuju elemen pemanas. Persamaan efisiensi penyimpanan panas dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{penyimpanan}} = \frac{Q_{\text{pasir}}}{E_{\text{input}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{penyimpanan}} = \frac{1.703,49}{4.099} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{penyimpanan}} = 41,56\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, efisiensi penyimpanan panas pada pasir silika mencapai sekitar **41,56%**. Artinya, sekitar 41,56% energi listrik yang

masuk menuju elemen pemanas berhasil terakumulasi sebagai kenaikan energi panas pada pasir silika.

Sementara itu, persentase energi yang belum terhitung sebagai energi panas pasir dapat ditentukan sebagai berikut:

$$E_{\text{tidak terhitung}} = 100\% - 41,56\%$$

$$E_{\text{tidak terhitung}} = 58,44\%$$

Nilai sebesar 58,44% tidak seluruhnya dapat dinyatakan sebagai energi yang hilang. Sebagian energi tersebut digunakan untuk meningkatkan temperatur elemen pemanas, tabung dalam, penutup, *coil* tembaga, sambungan pipa, dan komponen logam lainnya. Komponen-komponen tersebut ikut menyerap energi selama proses pemanasan, tetapi kapasitas panasnya belum dimasukkan ke dalam perhitungan.

Selain terserap oleh komponen konstruksi, sebagian energi panas berpindah menuju lingkungan melalui dinding tabung, penutup, sambungan mekanis, terminal elemen pemanas, lubang thermocouple, dan saluran pipa. Meskipun rockwool dan aluminium foil telah dipasang pada seluruh sisi tabung, material isolasi hanya mengurangi laju kehilangan panas dan tidak dapat menghentikan perpindahan panas sepenuhnya.

Perbedaan temperatur yang besar antara pasir silika dan lingkungan juga memengaruhi kehilangan panas. Semakin tinggi temperatur pasir, semakin besar kecenderungan panas berpindah dari bagian dalam sistem menuju lingkungan. Dengan demikian, kenaikan temperatur pasir tidak sepenuhnya sebanding dengan energi listrik yang masuk.

Perhitungan energi panas juga menggunakan temperatur rata-rata dari dua thermocouple. Kedua sensor hanya mengukur temperatur pada dua titik sehingga belum mewakili kondisi temperatur seluruh volume pasir silika. Apabila terdapat bagian pasir yang memiliki temperatur lebih tinggi atau lebih rendah daripada titik pengukuran, energi panas aktual yang tersimpan dapat berbeda dari hasil perhitungan.

Selain itu, nilai kapasitas panas spesifik pasir sebesar 830 J/kg°C dianggap tetap selama proses pemanasan. Pada kondisi sebenarnya, kapasitas panas spesifik

material dapat mengalami perubahan seiring peningkatan temperatur. Penggunaan nilai tetap dilakukan sebagai pendekatan untuk menyederhanakan perhitungan.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu meningkatkan temperatur rata-rata 57 kg pasir silika dari 100,25°C menjadi 229,88°C. Energi listrik masukan selama proses pemanasan mencapai sekitar 4.099 Wh, sedangkan energi panas yang berhasil tersimpan pada pasir diperkirakan sebesar 1.703,49 Wh. Hasil tersebut menghasilkan efisiensi penyimpanan panas sebesar 41,56%.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan menunjukkan bahwa prototipe *sand battery* mampu mengubah sebagian energi listrik dari panel surya menjadi energi panas yang tersimpan pada pasir silika. Nilai efisiensi yang diperoleh masih dapat ditingkatkan melalui penyempurnaan isolasi, pengurangan celah pada penutup, pengurangan jalur konduksi pada sambungan logam, serta penempatan elemen pemanas yang lebih optimal.

Nilai 41,56% merupakan efisiensi pengisian energi termal ke dalam pasir silika, bukan efisiensi keseluruhan sistem dari radiasi matahari hingga pemanfaatan panas. Efisiensi total belum dapat dihitung karena energi matahari yang diterima panel dan energi panas yang dimanfaatkan oleh oven belum diukur secara lengkap.