

BAB V

PENGUKURAN DAN PENGUJIAN ALAT

Pada bab ini dijelaskan hasil pengujian dan pengukuran terhadap sistem pemanas udara berbasis energi surya yang telah dirancang dan dibuat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem secara keseluruhan, mulai dari proses pemindahan panas dari media pasir ke udara. Dalam pengujian ini, digunakan dua buah panel surya 200 Wp yang disusun secara seri. Lalu tegangan dialirkan ke elemen pemanas (heater) DC berdaya 500W yang berfungsi memanaskan media pasir. Proses pemanasan kemudian ditransfer ke udara yang dialirkan melalui kipas angin. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan, arus, daya, serta temperatur yang dihasilkan selama proses berlangsung. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi pemanasan dan kestabilan sistem tanpa menggunakan baterai sebagai penyimpan daya. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel dan grafik guna mendukung analisis performa alat yang telah dibuat.

Pengujian sistem ini dilakukan di area terbuka, tepatnya di parkir an atas Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Pemilihan lokasi tersebut bertujuan agar panel surya dapat menerima paparan sinar matahari secara optimal tanpa hambatan dari bayangan bangunan atau pepohonan. Waktu pelaksanaan pengujian dimulai pukul 12.00 WIB, yakni pada saat intensitas cahaya matahari berada dalam kondisi maksimal. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa panel surya mampu menghasilkan energi listrik dengan efisiensi tinggi guna mendukung kinerja sistem pemanas udara yang dirancang.

5.1 Pengukuran dan Pengujian Daya Panel Surya

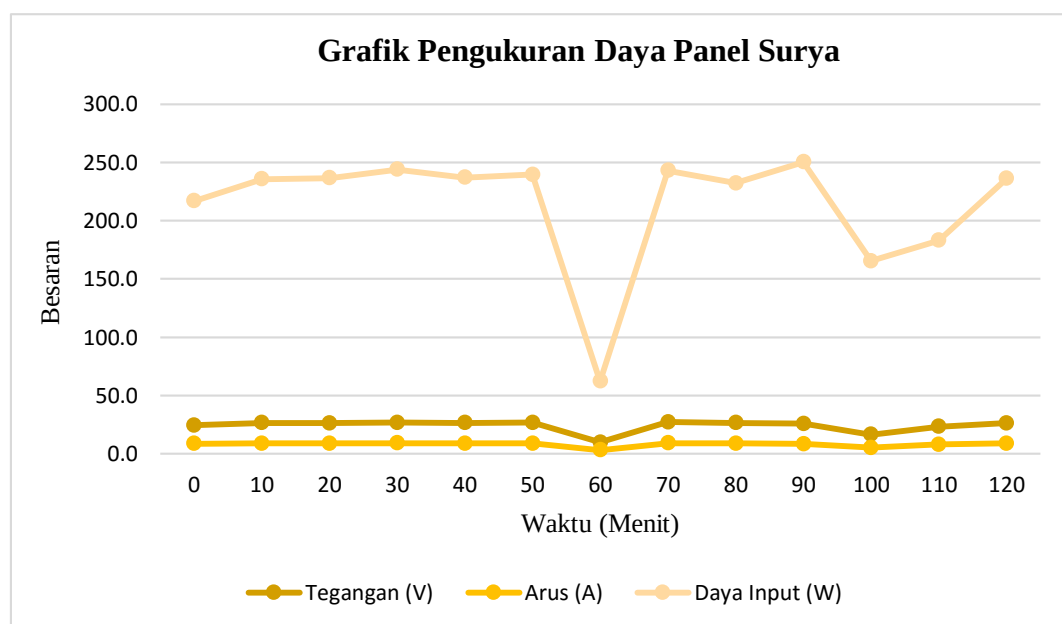
Pengujian daya panel surya dilakukan untuk mengetahui kemampuan panel dalam menghasilkan energi listrik berdasarkan intensitas cahaya matahari yang diterima. Dalam pengujian ini, diukur besarnya tegangan (volt), daya (watt), dan arus listrik (ampere) yang dihasilkan oleh dua panel surya 200 Wp yang disusun secara seri. Data pengujian diambil setiap 10 menit sekali selama total waktu 120 menit untuk mendapatkan hasil yang lebih representatif terhadap fluktuasi kondisi cuaca dan posisi matahari.

Tabel 5. 1 Data Pengukuran Daya Panel Surya

Data Pengukuran Daya Panel Surya						
NO.	Pukul (Jam)	Waktu (Menit)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Input (W)	Keterangan Cuaca
1	12.00	0	24.5	8.8	216.8	Cerah
2	12.10	10	26.5	9.0	235.7	Cerah
3	12.20	20	26.3	9.0	236.6	Cerah
4	12.30	30	26.9	9.1	244.0	Cerah
5	12.40	40	26.6	8.9	237.0	Cerah
6	12.50	50	26.8	9.0	239.5	Cerah
7	13.00	60	9.9	3.3	62.2	Berawan
8	13.10	70	27.3	9.1	243.0	Cerah
9	13.20	80	26.5	8.9	232.3	Cerah
10	13.30	90	25.8	8.5	250.2	Cerah
11	13.40	100	16.5	5.3	165.5	Cerah
12	13.50	110	23.5	8.0	183.1	Cerah
13	14.00	120	26.4	8.9	236.2	Cerah

Berdasarkan hasil pengukuran daya panel surya selama 120 menit, yang dilaksanakan mulai pukul 12.00 hingga 14.00 di lokasi terbuka dengan kondisi cuaca dominan cerah, diperoleh data variasi tegangan, arus, dan daya input yang menunjukkan fluktuasi seiring perubahan waktu dan kondisi langit. Pada awal pengujian pukul 12.00 (menit ke-0), panel menghasilkan tegangan sebesar 24,5 V dan arus 8,8 A, sehingga daya input tercatat sebesar 216,8 W dalam kondisi cerah. Memasuki pukul 12.10 hingga 12.50 (menit ke-10 hingga menit ke-50), cuaca tetap cerah dan intensitas radiasi matahari tinggi, menyebabkan tegangan panel stabil di kisaran 26,3–26,9 V dan arus di kisaran 8,9–9,1 A. Pada rentang waktu ini, daya input berada pada kisaran 235,7 W hingga 244,0 W, yang menunjukkan kinerja panel optimal untuk mendukung pemanasan media pasir sesuai desain sistem. Fenomena penurunan drastis terjadi pada pukul 13.00 (menit ke-60) ketika cuaca berubah menjadi berawan. Tegangan anjlok dari 26,8 V menjadi hanya 9,9 V, arus turun signifikan dari 9,0 A menjadi 3,3 A, dan daya input merosot tajam menjadi 62,2 W. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh awan tebal yang menutupi matahari, sehingga mengurangi secara drastis jumlah radiasi yang diterima permukaan panel. Setelah itu, kondisi cuaca kembali cerah pada pukul 13.10 (menit ke-70), membuat kinerja panel pulih. Tegangan naik kembali menjadi 27,3 V, arus 9,1 A, dan daya input meningkat menjadi 243,0 W. Kinerja optimal ini bertahan hingga pukul 13.30 (menit ke-90), di mana daya input mencapai titik maksimum selama pengujian yaitu 250,2 W. Namun, pada pukul 13.40 (menit ke-100) dan 13.50 (menit ke-110), meskipun cuaca tetap cerah, daya input turun menjadi 165,5

W dan 183,1 W. Penurunan ini dapat diakibatkan oleh faktor lain seperti perubahan sudut datang cahaya matahari, peningkatan suhu panel yang menurunkan efisiensi konversi, atau adanya pantulan cahaya yang tidak optimal. Pengujian diakhiri pada pukul 14.00 (menit ke-120) dengan daya input kembali naik menjadi 236,2 W dalam kondisi cerah. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa panel surya mampu mempertahankan daya input di kisaran 230–250 W pada kondisi cuaca cerah, namun sangat rentan terhadap penurunan daya saat terjadi gangguan pencahayaan. Variabilitas ini perlu diperhitungkan dalam pengoperasian sistem, terutama jika digunakan tanpa penyimpanan energi atau pengaturan beban, agar pemanasan tetap stabil meskipun terjadi perubahan kondisi cuaca.



Gambar 5. 1 Grafik Pengukuran Daya Panel Surya

5.1.1 Analisis Perhitungan Daya Panel Surya

Berdasarkan hasil pengukuran pada tabel "Data Pengukuran Daya Panel Surya", nilai daya maksimum panel surya tercatat pada menit ke-70 dengan tegangan 27,3 Volt dan arus 9,1 Ampere. Daya listrik saat itu dihitung menggunakan rumus:

$$P = V \times I = 27,3 \times 9,1 = 248,4 \text{ Watt}$$

Daya ini merupakan output tertinggi yang dicapai selama proses pengujian. Jika dibandingkan dengan total kapasitas maksimum dari dua panel surya yang disusun seri yaitu 400 Wp, maka efisiensi daya maksimum yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta_{\text{daya}} = \frac{248,4}{400} \times 100\% = 62,1\%$$

Artinya, sistem panel surya mampu bekerja dengan efisiensi sekitar 62,1% dari kapasitas puncaknya pada kondisi optimal. Untuk menghitung estimasi energi total yang digunakan selama proses pengujian selama 120 menit (2 jam), dilakukan pendekatan dengan menghitung daya rata-rata dari seluruh pengukuran.

Berdasarkan data pada Tabel 5.1, selain dianalisis dari sisi daya sesaat, dilakukan juga perhitungan efisiensi energi total selama 120 menit pengujian. Energi listrik aktual dihitung dengan pendekatan integrasi daya rata-rata dari seluruh pengukuran, sehingga diperoleh nilai sebesar 425,93 Wh. Sementara itu, energi teoritis maksimum yang dapat dihasilkan panel surya apabila beroperasi pada kapasitas penuh 400 Wp selama 120 menit (2 jam) adalah:

$$E_{\text{maks}} = 400\text{W} \times 120 \text{ menit} = 800\text{Wh}$$

Dengan demikian, efisiensi energi panel surya selama pengujian dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta_{\text{energi}} = \frac{425,93}{800} \times 100\% = 53,24\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa panel surya hanya mampu menghasilkan sekitar 53,24% dari kapasitas teoritisnya akibat dipengaruhi faktor cuaca, intensitas radiasi matahari, serta rugi-rugi sistem. Selanjutnya, energi listrik yang dialirkan ke heater dikonversi menjadi energi panas pada media pasir. Energi panas aktual dihitung menggunakan persamaan :

$$Q = m \times c \times \Delta T = 4 \times 830 \times 280,3 = 1.163.245\text{J} = 323,12 \text{ Wh}$$

Sehingga efisiensi transfer energi listrik ke panas dapat dihitung sebagai:

$$\eta_{\text{transfer}} = \frac{323,12}{425,93} \times 100\% = 75,86\%$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun energi listrik yang diperoleh dari panel surya tidak sepenuhnya optimal, proses konversi listrik menjadi panas pada media pasir berlangsung cukup efektif dengan efisiensi transfer

mencapai 75,86%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem penyimpanan energi termal menggunakan pasir memiliki potensi yang baik untuk mendukung pemanfaatan energi surya secara langsung, meskipun masih terdapat rugi-rugi pada tahap awal konversi energi listrik dari panel.

5.2 Pengukuran dan Pengujian Temperatur Pasir Saat Dipanaskan

Tabel 5. 2 Temperatur Pasir Saat Dipanaskan

Temperatur Pasir Saat Dipanaskan			
NO.	Pukul (Jam)	Waktu (Menit)	Suhu Pasir (°C)
1	12.00	0	34.2
2	12.10	10	44.7
3	12.20	20	51.7
4	12.30	30	58.1
5	12.40	40	85.2
6	12.50	50	90.3
7	13.00	60	168.0
8	13.10	70	170.1
9	13.20	80	232.3
10	13.30	90	250.2
11	13.40	100	256.9
12	13.50	110	280.2
13	14.00	120	314.5

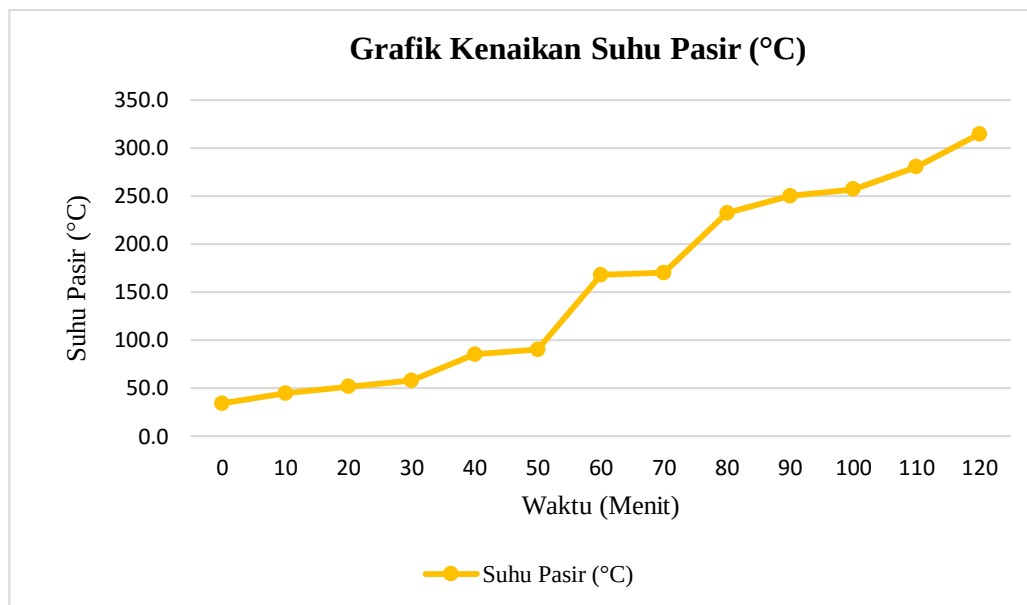
Pengukuran temperatur pasir dilakukan untuk mengetahui seberapa efektif elemen pemanas (*heater*) dalam mentransfer energi panas ke media pasir. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 menit sekali selama total 120 menit proses pemanasan. Hasil pengukuran ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan pasir silika sebagai media penyimpan panas serta kestabilan distribusi suhu yang dihasilkan oleh sistem pemanas berbasis panel surya.

Berdasarkan hasil pengukuran suhu pasir selama pengujian yang berlangsung selama 120 menit, mulai pukul 12.00 hingga 14.00, diperoleh data yang menunjukkan kenaikan suhu pasir secara bertahap akibat suplai panas dari elemen pemanas yang ditenagai oleh panel surya. Pada awal pengujian pukul 12.00 (menit ke-0), suhu awal pasir tercatat sebesar 34,2 °C, yang merupakan suhu awal

media sebelum menerima pemanasan. Setelah sistem diaktifkan dan panel surya mulai menyuplai daya ke elemen pemanas, suhu pasir mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Dalam 10 menit pertama, yaitu pukul 12.10 (menit ke-10), suhu pasir naik menjadi $44,7^{\circ}\text{C}$, menunjukkan adanya respons awal pemanasan yang cepat karena perbedaan suhu yang cukup besar antara elemen pemanas dan media pasir. Proses pemanasan terus berlangsung pada pukul 12.20 (menit ke-20) dengan suhu mencapai $51,7^{\circ}\text{C}$, kemudian pukul 12.30 (menit ke-30) suhu meningkat menjadi $58,1^{\circ}\text{C}$. Peningkatan suhu pada fase awal ini masih relatif moderat karena panas yang dihasilkan elemen pemanas diserap secara merata oleh seluruh massa pasir. Memasuki pukul 12.40 (menit ke-40), suhu pasir melonjak lebih tinggi hingga $85,2^{\circ}\text{C}$, diikuti kenaikan menjadi $90,3^{\circ}\text{C}$ pada pukul 12.50 (menit ke-50). Peningkatan suhu yang konsisten hingga menit ke-50 ini menunjukkan bahwa daya dari panel surya masih berada pada kisaran optimal karena cuaca yang cerah, sehingga pemanasan berjalan stabil.

Fenomena menarik terjadi pada pukul 13.00 (menit ke-60) ketika suhu pasir langsung meningkat signifikan menjadi $168,0^{\circ}\text{C}$. Lonjakan ini terjadi meskipun pada saat yang sama daya listrik dari panel surya mengalami penurunan drastis akibat cuaca berawan (berdasarkan tabel daya panel surya). Hal ini menunjukkan adanya efek penyimpanan panas pada elemen pemanas dan pasir, di mana panas yang telah terakumulasi pada elemen pemanas sebelumnya tetap ditransfer ke media pasir meskipun suplai daya berkurang. Pada pukul 13.10 (menit ke-70), suhu pasir hanya mengalami kenaikan tipis menjadi $170,1^{\circ}\text{C}$. Kenaikan yang melambat ini dapat disebabkan oleh perbedaan suhu antara pasir dan elemen pemanas yang mulai mengecil, sehingga laju perpindahan panas menurun. Setelah itu, pemanasan kembali meningkat pesat pada pukul 13.20 (menit ke-80) dengan suhu mencapai $232,3^{\circ}\text{C}$, diikuti oleh kenaikan menjadi $250,2^{\circ}\text{C}$ pada pukul 13.30 (menit ke-90). Periode ini bertepatan dengan daya input panel surya yang kembali tinggi karena cuaca cerah, sehingga elemen pemanas dapat bekerja pada kapasitas mendekati maksimum. Memasuki pukul 13.40 (menit ke-100), suhu pasir naik menjadi $256,9^{\circ}\text{C}$, kemudian pada pukul 13.50 (menit ke-110) mencapai $280,2^{\circ}\text{C}$. Laju kenaikan kembali tinggi pada fase ini karena panel surya masih mampu memasok daya yang cukup besar ke elemen pemanas. Pada akhir pengujian, pukul

14.00 (menit ke-120), suhu pasir mencapai 314,5 °C, yang merupakan suhu maksimum yang dicapai dalam uji ini. Pencapaian ini menunjukkan bahwa sistem mampu menaikkan suhu media pasir hampir 280 °C dari kondisi awal dalam waktu dua jam, dengan bantuan radiasi matahari yang sebagian besar berada dalam kondisi cerah.



Gambar 5. 2 Grafik Kenaikan Suhu Pasir

Secara keseluruhan, pola kenaikan suhu pasir yang terekam pada tabel ini memperlihatkan bahwa media pasir dapat menyerap dan menyimpan panas secara efektif, meskipun laju pemanasan dipengaruhi oleh variasi daya input dari panel surya akibat kondisi cuaca. Pada periode dengan suplai daya tinggi dan stabil, kenaikan suhu pasir berlangsung lebih cepat, sedangkan pada periode dengan suplai daya rendah atau fluktuatif, kenaikan suhu melambat. Data ini membuktikan bahwa media pasir berfungsi dengan baik sebagai penyimpan panas, yang dapat mempertahankan suhu tinggi meskipun terjadi penurunan sementara pada suplai daya.

5.2.1 Analisis Perhitungan Energi pada Pengujian Kenaikan Suhu Pasir

Pengujian kenaikan suhu pasir dilakukan selama 120 menit dengan memanfaatkan energi listrik dari dua panel surya yang disusun seri, menghasilkan

total kapasitas 400 Wp. Energi ini digunakan untuk mengoperasikan heater berdaya 500W dan tegangan 40V DC, yang tertanam di bagian atas media pasir. Proses pemanasan dilakukan terhadap pasir silika seberat 8 kg, yang disimpan di dalam wadah tertutup sebagai media penyimpan panas.

Berdasarkan data hasil pengukuran, suhu awal pasir tercatat sebesar 34,2°C, dan meningkat secara bertahap hingga mencapai suhu maksimum sebesar 314,5°C pada menit ke-120. Untuk menghitung jumlah energi panas yang diserap oleh pasir, digunakan rumus energi kalor:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Dengan:

Q = Energi panas yang disimpan (dalam joule)

m = Massa Pasir = 4 kg

c = Kalor Jenis Pasir Silika = 830 J/kg°C

ΔT = Perubahan Suhu = 314.5°C – 34.2°C = 280.3°C

$$Q = 4 \cdot 830 \cdot 280.3 = 930.596 \text{ Joule}$$

Energi panas tersebut kemudian dikonversikan ke satuan Watt-hour (Wh) agar lebih relevan dalam konteks kelistrikan. Dengan konversi:

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Joule} \Rightarrow \frac{930.596}{3600} \approx 258.5 \text{ Wh}$$

Artinya, selama 120 menit pengujian, pasir berhasil menyimpan energi panas sebesar 258.5 Wh. Energi ini ekuivalen dengan konsumsi daya 258.5 watt selama satu jam penuh. Nilai ini menunjukkan potensi pasir silika sebagai media penyimpan energi termal yang efisien, terutama dalam aplikasi pemanas udara berbasis energi terbarukan. Selama proses pemanasan, suhu pasir tidak meningkat secara linear. Pada awal pengujian (0–60 menit), suhu pasir mengalami peningkatan yang lambat. Namun, mulai menit ke-60 ke atas, suhu mulai naik tajam dari 168°C menjadi 314,5°C, mengindikasikan bahwa panas mulai tersimpan dengan efektif di seluruh volume pasir. Fenomena ini disebabkan karena pasir awalnya menyerap sebagian besar panas untuk menaikkan suhu partikel permukaannya terlebih dahulu. Setelah permukaan mencapai suhu tinggi, panas mulai merambat lebih cepat ke bagian dalam pasir. Namun demikian, laju kenaikan suhu mulai melambat kembali setelah mendekati suhu maksimum. Ini dapat terjadi karena:

- Losses panas ke lingkungan akibat perbedaan suhu tinggi antara pasir dan udara luar
- Resistansi termal internal pasir yang meningkat pada suhu tinggi
- Efisiensi konversi energi heater yang menurun saat voltase panel berfluktuasi karena kondisi intensitas cahaya matahari.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sistem penyimpanan panas berbasis pasir silika cukup efektif menyerap dan mempertahankan energi termal dalam jumlah besar dalam waktu terbatas, serta dapat dioptimalkan lebih lanjut dengan pengaturan isolasi termal dan efisiensi distribusi panas.

5.3 Pengukuran dan Pengujian Ketahanan Panas Baterai Pasir Tanpa Beban

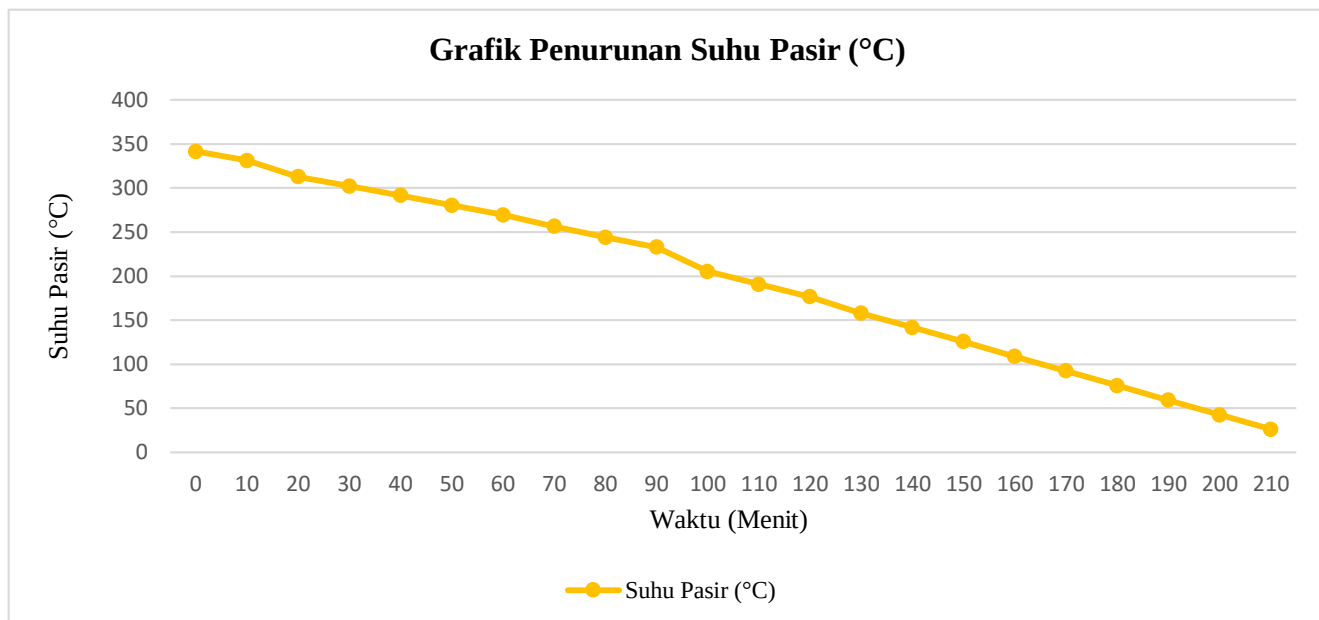
Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pasir mampu mempertahankan suhu setelah proses pemanasan dihentikan. Setelah elemen pemanas dimatikan, suhu pasir dipantau setiap 10 menit sekali dalam rentang waktu 120 menit tanpa adanya aliran udara atau beban keluar. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengamati kemampuan retensi panas media pasir sebagai penyimpan energi termal dan mengevaluasi potensi penggunaannya dalam sistem pemanas pasif atau penyimpanan energi jangka pendek.

Tabel 5. 3 Ketahanan Panas Baterai Pasir Tanpa Beban

Ketahanan Panas Baterai Pasir Tanpa Beban			
NO.	Pukul (Jam)	Waktu Setelah Pemanas Dimatikan (Menit)	Suhu Pasir (°C)
1	14.00	0	341.5
2	14.10	10	331.4
3	14.20	20	312.9
4	14.30	30	302.3
5	14.40	40	291.7
6	14.50	50	280.4
7	15.00	60	269.5
8	15.10	70	256.6
9	15.20	80	244.1
10	15.30	90	232.9
11	15.40	100	205.5
12	15.50	110	190.8
13	16.00	120	176.6
14	16.10	130	157.8
15	16.20	140	141.9
16	16.30	150	125.7
17	16.40	160	108.7
18	16.50	170	92.3
19	17.00	180	75.7
20	17.10	190	59.1
21	17.20	200	42.6
22	17.30	210	26.2

Berdasarkan data pada tabel, pengujian dilakukan untuk memantau penurunan suhu pasir setelah elemen pemanas dimatikan, dimulai pada pukul 14.00 dengan suhu awal sebesar 341,5 °C. Data menunjukkan bahwa pasir mampu mempertahankan panas dalam jangka waktu yang cukup lama meskipun tidak lagi menerima suplai energi dari pemanas. Pada 10 menit pertama (pukul 14.10), suhu hanya turun sekitar 10,1 °C menjadi 331,4 °C. Penurunan suhu ini berlanjut secara bertahap pada menit ke-20 (14.20) menjadi 312,9 °C dan menit ke-30 (14.30) menjadi 302,3 °C. Hingga menit ke-50 (14.50), suhu masih berada di kisaran 280,4 °C, menunjukkan bahwa media pasir memiliki kapasitas panas yang cukup besar untuk menahan energi termal. Setelah satu jam tanpa pemanasan (pukul 15.00), suhu pasir berada di 269,5 °C. Laju pendinginan tetap relatif stabil, dengan suhu menurun ke 256,6 °C pada pukul 15.10 dan 244,1 °C pada pukul 15.20. Memasuki pukul 15.30 (menit ke-90), suhu menurun menjadi 232,9 °C, kemudian mengalami penurunan yang lebih signifikan seiring semakin besarnya perbedaan suhu pasir

dengan suhu lingkungan. Pada pukul 15.40 dan 15.50, suhu masing-masing tercatat 205,5 °C dan 190,8 °C, lalu menjadi 176,6 °C pada pukul 16.00. Setelah dua jam pendinginan (pukul 16.00–16.30), suhu pasir berada di kisaran 176,6 °C hingga 125,7 °C. Selanjutnya, pada pukul 16.40, suhu turun menjadi 108,7 °C, lalu 92,3 °C pada pukul 16.50. Penurunan suhu semakin cepat di bawah kisaran 100 °C, di mana pada pukul 17.00 suhu menjadi 75,7 °C, lalu 59,1 °C pada pukul 17.10, dan 42,6 °C pada pukul 17.20. Akhirnya, pada pukul 17.30 atau 210 menit setelah pemanas dimatikan, suhu pasir mencapai 26,2 °C yang hampir setara dengan suhu lingkungan. Faktor yang memengaruhi laju penurunan suhu ini tidak semata-mata berasal dari sifat termal pasir itu sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh desain wadah penyimpanan. Bagian atas wadah memiliki rongga cukup besar sebagai tempat pemasangan kipas, sehingga memungkinkan pelepasan panas ke lingkungan berlangsung lebih cepat. Selain itu, jumlah pasir yang digunakan relatif sedikit, hanya sekitar 4 kg, sehingga kapasitas penyimpanan panasnya lebih terbatas dibandingkan jika digunakan massa pasir yang lebih besar. Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa media pasir memiliki kemampuan penyimpanan panas yang baik. Meskipun tidak lagi mendapatkan suplai panas, pasir mampu mempertahankan suhu di atas 200 °C selama hampir dua jam, dan membutuhkan lebih dari tiga jam untuk turun hingga mendekati suhu lingkungan. Karakteristik ini menunjukkan potensi baterai pasir sebagai media penyimpanan energi termal untuk aplikasi sistem pemanas udara yang membutuhkan suplai panas berkelanjutan meskipun sumber energi terputus.



Gambar 5. 3 Grafik Penurunan Suhu Pasir

5.3.1 Analisis Perhitungan Ketahanan Panas Baterai Pasir Tanpa Beban

Setelah proses pemanasan dihentikan, dilakukan pengujian terhadap ketahanan panas pasir selama 210 menit tanpa diberi beban. Pengukuran dilakukan setiap 10 menit sekali, dimulai dari suhu awal 341,5°C hingga suhu akhir 26,2°C. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui laju penurunan suhu, energi panas yang hilang, dan efisiensi penyimpanan panas dari media pasir sebagai penyimpan energi termal.

1. Laju Penurunan Suhu (*Cooling Rate*)

Laju penurunan suhu dihitung berdasarkan selisih suhu antar interval waktu. Pada interval 0–10 menit, suhu pasir menurun dari 341,5°C menjadi 331,4°C, atau sebesar $\Delta T = 10,1^\circ\text{C}$. Dengan selang waktu $\Delta t = 10$ menit, maka:

$$\text{Laju Penurunan Suhu} = \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{10,1}{10} = 1,01^\circ\text{C}/\text{menit}$$

Dari data tabel terlihat bahwa laju penurunan suhu tertinggi terjadi pada awal pendinginan (menit 0–30), sedangkan setelah menit ke-60, penurunan suhu berlangsung lebih lambat. Misalnya, pada menit ke-100 hingga 110, suhu hanya turun dari 205,5°C menjadi 190,8°C, yaitu selisih 14,7°C selama 10 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah suhu pasir, laju

pelepasan panas ke lingkungan juga menurun, seiring dengan berkurangnya gradien suhu antara pasir dan udara sekitar.

2. Estimasi Energi Panas yang Hilang

Energi panas yang hilang dihitung menggunakan rumus:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Dengan:

Q = Energi panas yang disimpan (dalam joule)

m = Massa pasir = 4 kg

c = Kalor jenis pasir silika = 830 J/kg°C

ΔT = Perubahan suhu = 341,5°C – 26,2°C = 315,3°C

$$Q = 4 \cdot 830 \cdot 315,3 = 1.046.796 \text{ Joule}$$

Energi ini dikonversi ke satuan Wh:

$$\frac{1.046.796}{3600} = 290.78 Wh$$

Jadi, selama proses pendinginan 210 menit, pasir melepaskan energi panas sebesar 290.78 Wh.

3. Persentase Kehilangan Energi dan Efisiensi Panas

Untuk mengetahui efisiensi penyimpanan panas, dihitung persentase panas yang hilang dan yang tersisa. Dengan suhu awal 341,5°C dan suhu akhir 26.2°C, dengan ΔT sebesar 315.3°C

$$\%Kehilangan \text{ Energi} = \frac{\Delta T}{T_{awal}} \times 100\% = \frac{315.3}{341,5} \times 100\% = 92.33\%$$

$$\%Panas \text{ tersisa} = \frac{T_{akhir}}{T_{awal}} \times 100\% = \frac{26.2}{341,5} \times 100\% = 7.6\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa pasir masih mempertahankan sekitar 8% dari total energi panas awalnya setelah 210 menit pendinginan tanpa pemanasan tambahan. Ini menandakan bahwa pasir memiliki sifat penyimpanan panas yang sangat baik dan efisien sebagai baterai termal alami, terutama untuk sistem pemanas udara berbasis energi surya.

5.4 Pengukuran dan Pengujian Distribusi Panas Udara

Distribusi panas udara merupakan tahapan akhir dari sistem, di mana udara dingin dari lingkungan dialirkan melewati media pasir yang telah dipanaskan. Udara menyerap energi panas melalui proses konveksi saat melewati celah-celah pasir yang panas, lalu dialirkan keluar menggunakan kipas angin. Proses ini menunjukkan bagaimana panas yang tersimpan dalam media pasir dapat digunakan untuk meningkatkan suhu udara secara langsung, tanpa memerlukan media tambahan.

Tabel 5. 4 Distribusi Panas Udara

Distribusi Panas Udara					
NO.	Waktu (Menit)	Suhu Pasir (°C)	Suhu Udara Masuk (°C)	Suhu Udara Keluar (°C)	ΔT Udara (°C)
1	0	341.5	33.5	57.3	23.8
2	10	253.2	33.5	55.2	21.7
3	20	248.4	33.5	53.4	19.9
4	30	240.5	33.5	51.2	17.7
5	40	235.2	33.5	49.5	16.0
6	50	231.1	33.5	47.4	13.9
7	60	225.6	33.5	45.1	11.6

Berdasarkan tabel distribusi panas udara, dapat diamati bahwa suhu udara yang keluar dari media pasir menunjukkan penurunan bertahap seiring dengan menurunnya suhu pasir. Pada menit ke-0, suhu pasir mencapai 341,5°C, menghasilkan suhu udara keluar sebesar 57,3°C dengan selisih suhu (ΔT) sebesar 23,8°C dibandingkan suhu udara masuk yang tetap konstan pada 33,5°C. Selisih suhu yang tinggi ini menunjukkan bahwa saat suhu pasir masih sangat tinggi, proses transfer panas dari pasir ke udara berlangsung secara optimal. Memasuki menit ke-10, suhu pasir turun drastis menjadi 253,2°C. Meskipun penurunannya cukup besar, udara keluar masih berada di 55,2°C, dengan ΔT sebesar 21,7°C. Ini menunjukkan bahwa meskipun suhu pasir turun, kemampuan konveksi termal pasir masih cukup kuat dalam memanaskan udara. Pada menit ke-20 dan 30, suhu pasir masing-masing berada pada 248,4°C dan 240,5°C, dengan ΔT yang menurun bertahap menjadi 19,9°C dan 17,7°C. Penurunan ini mencerminkan bahwa konduksi panas dari pasir ke udara mulai melambat seiring dengan berkurangnya cadangan energi termal di pasir. Pada menit ke-40 hingga menit ke-60, suhu pasir terus mengalami penurunan menjadi 235,2°C, 231,1°C, dan 225,6°C secara berturut-turut. Selisih suhu udara (ΔT) pun turut menurun menjadi 16,0°C, 13,9°C, dan akhirnya 11,6°C. Penurunan

ini disebabkan oleh dua faktor utama: pertama, pasir secara bertahap kehilangan panas ke lingkungan melalui konduksi dengan dinding wadah dan konveksi alami; dan kedua, suhu udara masuk yang tetap konstan membuat gradien suhu antara pasir dan udara menjadi lebih kecil, sehingga memperlambat laju perpindahan panas. Selain itu, karena sistem tidak mendapatkan tambahan energi setelah pemanasan awal, energi panas yang tersimpan dalam pasir secara alamiah akan terus menurun seiring waktu. Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa media pasir mampu mendistribusikan panas secara efektif ke udara hingga 60 menit setelah pemanasan dimulai. Meskipun terjadi penurunan efektivitas transfer panas seiring waktu, sistem masih mampu menghasilkan udara hangat secara konsisten. Hal ini membuktikan bahwa pasir silika efektif sebagai media penyimpanan dan pelepas energi termal untuk aplikasi pemanas udara.

5.4.1 Analisis Perhitungan Distribusi Panas Udara

Tabel distribusi panas udara menunjukkan nilai perubahan suhu udara (ΔT) setelah dialirkan melalui media pasir panas dalam rentang waktu 60 menit. Suhu udara masuk dijaga konstan sebesar $33,5^{\circ}\text{C}$, sementara suhu keluar menurun dari $57,3^{\circ}\text{C}$ pada menit ke-0 menjadi $45,1^{\circ}\text{C}$ pada menit ke-60. Perbedaan suhu ini mencerminkan efektivitas transfer panas dari pasir ke udara yang mengalir secara konveksi paksa.

1. Nilai Laju Massa Udara

Laju aliran volumetrik udara yang digunakan dalam sistem adalah $0,1179 \text{ m}^3/\text{s}$. Dengan asumsi massa jenis udara sebesar $1,2 \text{ kg/m}^3$, maka laju massa udara dapat dihitung menggunakan rumus:

$$m = \rho \cdot V$$

Dengan:

m = Laju massa udara (kg/s)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

V = Laju aliran volumetri udara (m^3/s)

$$m = 1,2 \cdot 0,1179 = 0,14148 \text{ kg/s}$$

2. Perhitungan Energi Panas

Energi panas yang ditransfer ke udara dihitung menggunakan persamaan kalor:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \cdot \Delta t$$

Dengan:

$$m = 0,14148 \text{ kg/s}$$

$$c = 1005 \text{ J/kg}$$

ΔT = Data dari tabel

$$\Delta t = 600 \text{ detik (10 menit)}$$

Maka diperoleh energi panas pada tiap interval waktu sebagai berikut:

Tabel 5. 5 Hasil Energi Panas Tiap Interval

Waktu (Menit)	ΔT Udara ($^{\circ}\text{C}$)	Energi (kJ)
0	23,8	2030.2 kJ
10	21,7	1851.8 kJ
20	19,9	1698.2 kJ
30	17,7	1510.4 kJ
40	16,0	1360.6 kJ
50	13,9	1181.9 kJ
60	11,6	986.7 kJ

3. Total Energi Panas yang Ditransfer

Dengan menjumlahkan seluruh energi tiap interval, total energi panas yang berhasil ditransfer selama 60 menit adalah:

$$Q_{\text{total}} = 2030.2 + 1851.8 + 1698.2 + 1510.4 + 1360.6 + 1181.9 + 986.7 = 10619.8 \text{ kJ} \approx 10.6 \text{ MJ}$$

Nilai total energi sebesar 10,6 MJ menunjukkan bahwa sistem memiliki performa transfer panas yang sangat baik. Energi terbesar ditransfer pada menit ke-0 saat suhu pasir masih tinggi (ΔT maksimum $23,8^{\circ}\text{C}$), dan secara bertahap menurun seiring berkurangnya suhu pasir. Meskipun demikian, sistem tetap mampu menjaga aliran panas yang stabil hingga akhir pengujian. Dengan efisiensi distribusi panas yang tinggi dan kapasitas pelepasan panas bertahap, baterai pasir terbukti efektif sebagai media penyimpan panas untuk sistem pemanas udara tenaga surya tanpa baterai listrik.