

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada bagian ini akan dibahas mengenai proses pengujian dan analisa kinerja Rancang bangun sistem penyimpanan panas dari media pasir silika dan transfer udara ke kotak penyimpanan panas dengan blower berbasis monitoring suhu ESP32 dan sensor *thermocouple*. Fokus utama pengujian adalah membandingkan suhu pada media pasir silika sebagai sumber panas dengan suhu hasil transfer panas di dalam kotak penyimpanan, sekaligus mengetahui persentase efisiensi transfer panas yang terjadi pada proyek tugas akhir ini. Serta mengetahui suhu pasir silika saat dipanaskan serta ketahanan suhu pasir silika tanpa beban dari panel surya.

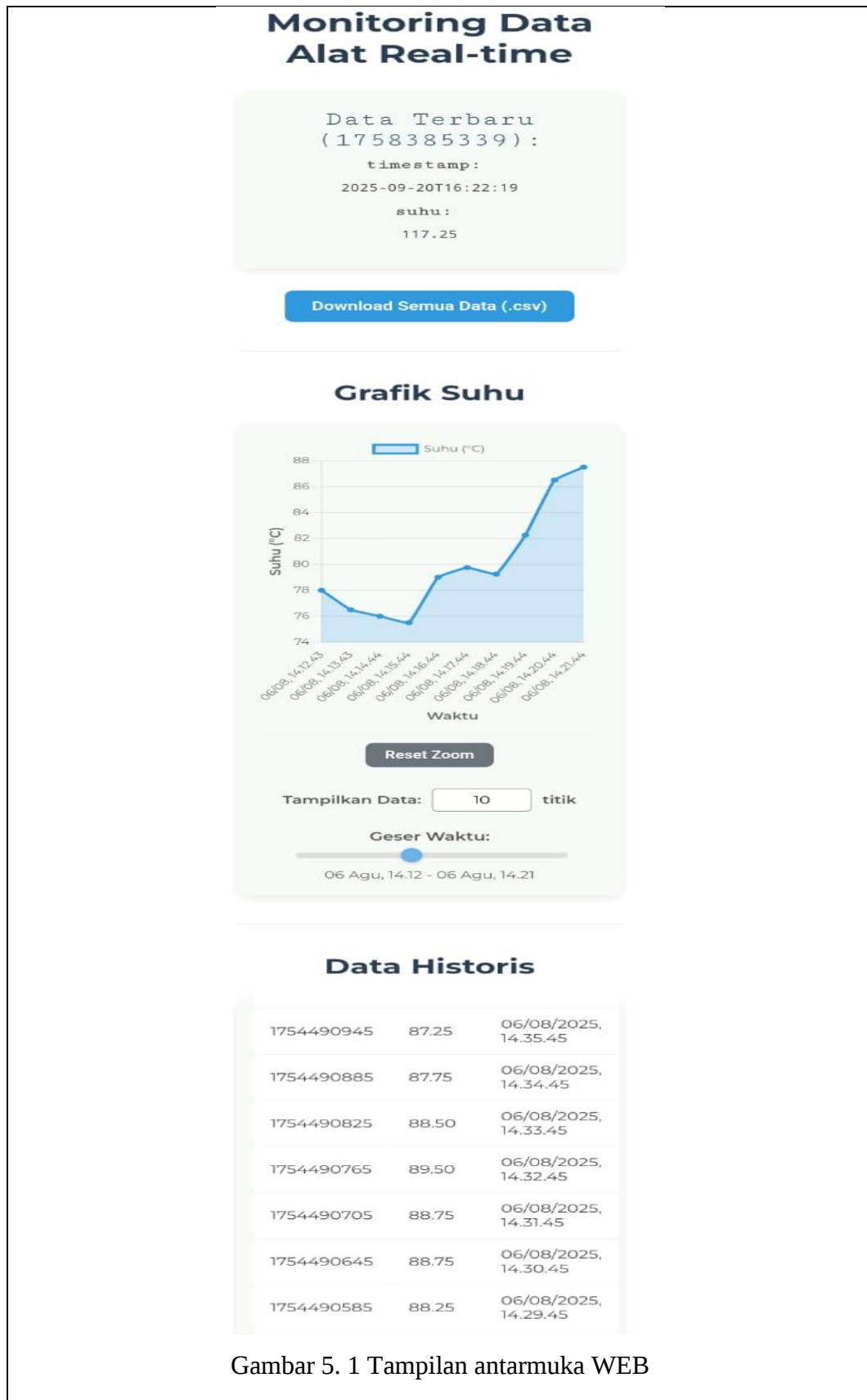
5.1 Prosedur Pengujian dan Pengukuran

Prosedur ini mengevaluasi dinamika pemanasan media pasir silika menggunakan elemen pemanas 240 V dengan daya 3 kw atau 3000 watt dan besaran arus 12.5 ampere yang diberdayakan dari sumber energi matahari oleh panel surya.

Dalam tugas akhir ini, pasir dalam media tabung dengan massa pasir 15 kg, C_p sebesar 800 J/kg.K, dan kenaikan suhu 294°C (dari 31°C sebagai suhu lingkungan menjadi 325°C suhu pasir saat dipanaskan), maka energi sebesar 3.528.000 Joule atau setara 3,33 kWh dapat disimpan. Berdasarkan perhitungan konversi satuan energi, 3.528.000 Joule setara dengan 0,98 kWh. Konversi ini didasarkan pada hubungan fundamental antara satuan Joule dan kilowatt-hour, dimana 1 kWh sama dengan 3.600.000 Joule (karena 1 kW = 1000 watt dan 1 hour = 3600 detik, sehingga 1 kWh = 1000 watt $\times$ 3600 detik = 3.600.000 Joule). Dengan demikian, untuk mengkonversi 3.528.000 Joule menjadi kWh, kita membagi nilai tersebut dengan 3.600.000, yang menghasilkan 0,98 kWh

Monitoring suhu MAX6675 dan sensor termokopel tipe K dikalibrasi dan termometer manual sebagai pembanding referensi sebelum digunakan. Pengukuran suhu dilakukan pada temperatur pasir silika saat dipanaskan, temperatur pasir silika saat dimatikan bebanya dan Efektifitas transfer udara panas dari media pasir silika ke kotak penyimpanan panas. Dengan data monitoring dapat dilihat di antarmuka web.

<https://datalogger-thermocouple-k.web.app/>



Gambar 5. 1 Tampilan antarmuka WEB

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

No.	document	suhu	timestamp
1	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 09:57:51
2	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 09:58:21
3	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 09:58:51
4	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 09:59:21
5	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 09:59:51
6	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:00:21
7	1,75E+09	29.75	17/06/2025, 10:00:51
8	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:01:22
9	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:01:52
10	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:02:22
11	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:02:52
12	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 10:03:22
13	1,75E+09	29	17/06/2025, 10:03:52
14	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:04:22
15	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 10:04:52
16	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 10:05:22
17	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:05:52
18	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:06:22
19	1,75E+09	29.25	17/06/2025, 10:06:52
20	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:07:22
21	1,75E+09	29.75	17/06/2025, 10:07:52
22	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:08:22
23	1,75E+09	29.75	17/06/2025, 10:08:52
24	1,75E+09	29.75	17/06/2025, 10:09:22
25	1,75E+09	29.5	17/06/2025, 10:09:53

Gambar 5. 2 Hasil data logger excel

5.2 Langkah – Langkah Pengujian

Pengujian rancang bangun tugas akhir ini dilakukan dengan mempersiapkan semua peralatan perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam sistem penyimpanan panas dari media pasir silika dan transfer udara ke kotak penyimpanan panas dengan blower berbasis monitoring suhu ESP32 dan sensor *thermocouple*. Memastikan semua komponen terpasang sesuai dengan rancangan rangkaian dan perangkat dalam kondisi baik. Adapun langkah – langkah dalam proses pengukuran dan pengujian sistem pemantauan kualitas udara adalah sebagai berikut.

1. Pemasangan panel surya di area terbuka dan menghubungkan ke breaker dan menghubungkan heater untuk dapat menghasilkan energi listrik dari panel surya tersebut.

Dalam proyek tugas akhir ini menggunakan 2 x 100 wp dan dihubungkan secara seri sehingga Tegangan MPP total = $2 \times 18.24 \text{ V} = 36.48 \text{ V}$, Arus MPP total = 10.96 A dan Daya pada MPP total $\approx 2 \times 200 \text{ W} = 400 \text{ W}$

2. *Heather* akan memanaskan pasir Ketika heater sudah terhubung dengan panel surya. *Heather* 240 V dengan daya 3kW serta arus 12,5 A
3. Melakukan pengukuran suhu pasir, suhu transfer ke kotak penyimpanan

4. Mempersiapkan alat ukur komersial yang akan digunakan pada uji coba sensor secara individual yang digunakan pada rancang bangun tugas akhir.
5. Memastikan dengan pengujian koneksi sistem monitoring suhu. apakah data tercatat dengan baik dan dapat diakses untuk analisa lebih lanjut

5.3 Pengujian dan Analisa Alat

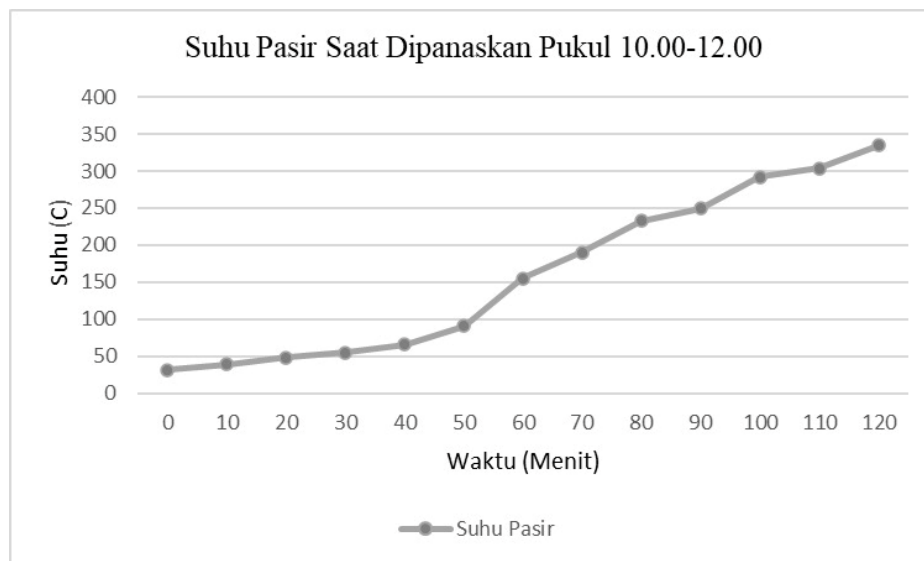
5.3.1 Pengukuran dan Pengujian Penyimpanan Panas Pasir Silika Saat Dipanaskan dengan *Heater* dari Sistem Panel Surya

Pengujian awal dilakukan untuk mengetahui kemampuan pasir silika dalam menyimpan energi panas ketika dipanaskan menggunakan sumber panas dari panel surya melalui sistem konversi. Berdasarkan hasil pengukuran pada pukul 10.00 – 12.00, suhu awal pasir silika berada pada kisaran 31,5 °C. Seiring dengan bertambahnya waktu pemanasan, terjadi kenaikan suhu yang signifikan hingga mencapai 334,75 °C pada menit ke-120. Sementara itu, hasil pengukuran pada pukul 12.00 – 14.00, suhu awal pasir silika berada pada kisaran 31,75 °C. Seiring dengan bertambahnya waktu pemanasan, terjadi kenaikan suhu yang signifikan hingga mencapai 325,25 °C pada menit ke-120. Kenaikan suhu ini menunjukkan bahwa pasir silika memiliki sifat thermal storage yang baik, dimana energi panas dapat diserap dan disimpan dalam jumlah besar. Pola pemanasan cenderung meningkat secara eksponensial, artinya laju kenaikan suhu semakin cepat setelah mencapai titik tertentu. Hal ini sejalan dengan karakteristik pasir silika sebagai material dengan kapasitas panas yang cukup tinggi serta kemampuan konduktivitas termal yang stabil.

Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan pukul 10.00 – 12.00			
No	Pukul	Waktu (menit)	Suhu Pasir (C)
1	10.00	0	31.5
2	10.10	10	39
3	10.20	20	48
4	10.30	30	55
5	10.40	40	66
6	10.50	50	90.5
7	11.00	60	155.25

8	11.10	70	190.5
9	11.20	80	232.5
10	11.30	90	249.25
11	11.40	100	291.75
12	11.50	110	303.75
13	12.00	120	334.75

Tabel 5. 1 Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan pukul 10.00 – 12.00



Gambar 5. 3 Grafik Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan

Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan Pukul 12.00 – 14.00			
No	Pukul	Waktu (menit)	Suhu Pasir (C)
1	12.00	0	31.75
2	12.10	10	45.5
3	12.20	20	58.25
4	12.30	30	66
5	12.40	40	86
6	12.50	50	110.25
7	13.00	60	168.25
8	13.10	70	189.5
9	13.20	80	224.5
10	13.30	90	291.75
11	13.40	100	303.5
12	13.50	110	314.5
13	14.00	120	325.25

Tabel 5. 2 Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan Pukul 12.00 – 14.00



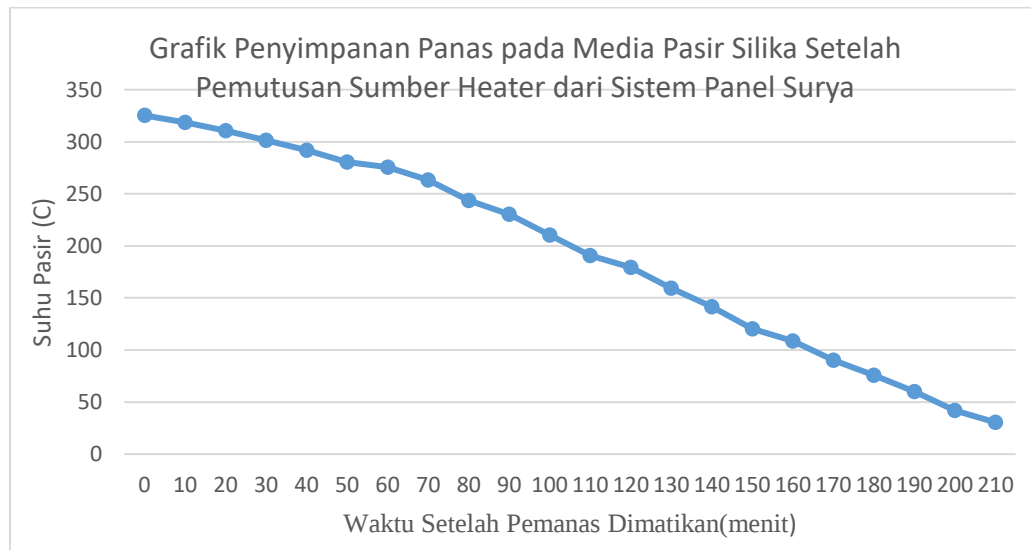
Gambar 5. 4 Grafik Suhu Pasir Silika Saat Dipanaskan

5.3.2 Pengukuran dan Pengujian Suhu Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber *Heater* dari Panel Surya

Setelah pemanasan dihentikan dan *heater* tidak terhubung lagi pada sumber energi panel surya, maka dilakukan pengujian untuk mengetahui ketahanan panas pasir silika tanpa beban atau sumber pemanas. Suhu awal setelah pemanas dimatikan berada pada 325,25 °C. Dalam rentang waktu 210 menit, suhu pasir mengalami penurunan hingga mencapai 30,5 °C. Laju penurunan suhu tidak terjadi secara linier. Pada awal pendinginan, penurunan suhu berlangsung relatif cepat sekitar 325 °C ke 275 °C dalam 60 menit. Namun, setelah itu penurunan menjadi lebih lambat, menunjukkan bahwa pasir silika mampu mempertahankan sisa energi panas dalam kurun waktu tertentu. Fenomena ini membuktikan bahwa pasir silika tidak hanya berfungsi baik sebagai media penyimpan panas ketika dipanaskan, tetapi juga cukup efektif dalam mempertahankan panas. Dengan adanya kemampuan retensi panas tersebut, pasir silika dapat menjaga suhu ruang penyimpanan atau oven tetap stabil dalam periode tertentu meskipun sumber pemanas sudah tidak beroperasi.

Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber Heater dari Sistem Panel Surya			
NO	Pukul	Waktu Setelah Pemanas Dimatikan	Suhu Pasir (C)
1	14.00	0	325.25
2	14.10	10	318.5
3	14.20	20	310.5
4	14.30	30	301.25
5	14.40	40	291.75
6	14.50	50	280.5
7	15.00	60	275.5
8	15.10	70	263.25
9	15.20	80	243.5
10	15.30	90	230.25
11	15.40	100	210.5
12	15.50	110	190.75
13	16.00	120	179.25
14	16.10	130	159.25
15	16.20	140	141.5
16	16.30	150	120.25
17	16.40	160	108.75
18	16.50	170	90.25
19	17.00	180	75.75
20	17.10	190	60
21	17.20	200	42
22	17.30	210	30.5

Tabel 5. 3 Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber Heater dari Sistem Panel Surya



Gambar 5. 5 Grafik Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber Heater dari Sistem Panel Surya

- Massa pasir silika, $m = 15 \text{ kg}$
- Kapasitas panas (C_p) = 800 J/Kg
- Suhu awal = 325.25°C
- Suhu akhir = 30.5°C

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

$$= \Delta T = T_{\text{awal}} - T_{\text{akhir}} = 325,25 - 30,5 = 294,75^\circ\text{C}$$

$$= 15 \cdot 800 \cdot 294,75$$

$$= 3.540.6000 \text{ J} = 3.54 \text{ MJ}$$

Jadi energi panas yang tersimpan di pasir silika sejak diputus dari heater sampai mendingin ke 30.5°C adalah $\pm 3.54 \text{ MJ}$. Dapat diketahui pada proses ini kita dapat mengetahui interval energi yang diperoleh dalam interval waktu tertentu disini menunjukkan penyimpanan baterai pasir berupa energi yang diperoleh dari penyimpanan pasir tersebut

Energi yang disimpan pada tiap interval waktu

- $t = 0 \text{ menit}$, $T = 325,25^\circ\text{C}$

$$Q(0) = 15.800.(325.25 - 30.5) = 3.54 \text{ MJ}$$

- $t = 60 \text{ menit}$, $T = 275,5^\circ\text{C}$

$$Q(0) = 15.800.(275,5 - 30,5) = 2,94 \text{ MJ}$$

- $t = 120 \text{ menit}$, $T = 179,25^\circ \text{C}$

$$Q(0) = 15.800.(179,25 - 30,5) = 1,78 \text{ MJ}$$

- $t = 210 \text{ menit}$, $T = 30,5^\circ \text{C}$

$$Q(0) = 15.800.(30,5 - 30,5) = 0 \text{ MJ}$$

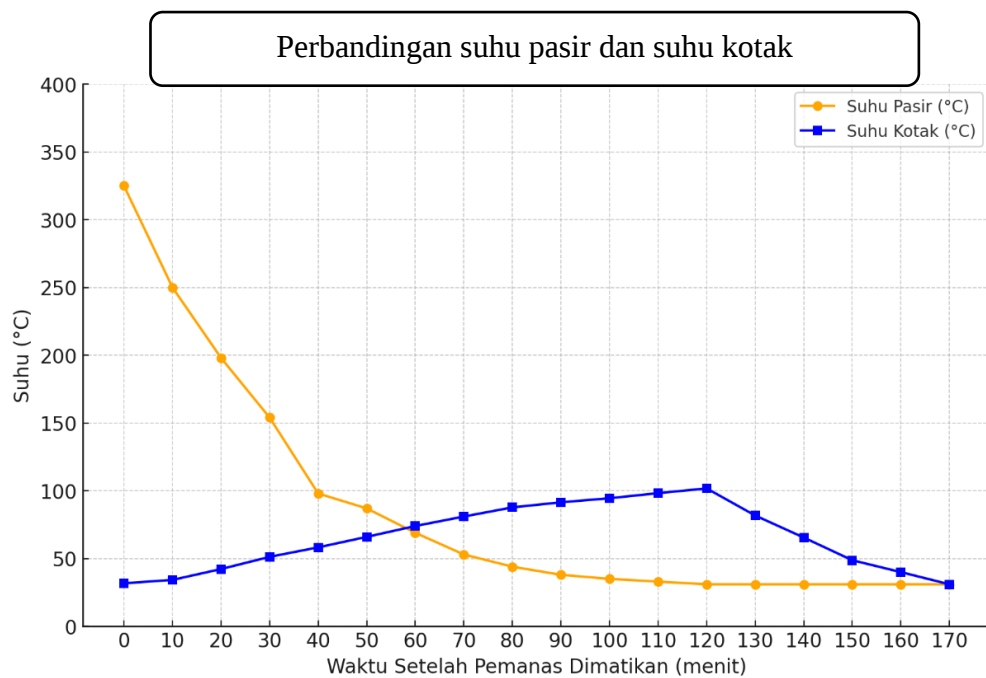
Berdasarkan hasil perhitungan energi termal yang tersimpan pada media pasir silika dengan massa 15 kg dan kapasitas panas spesifik sebesar 800 J/kg·K, diperoleh bahwa pada saat awal pemutusan heater ($t = 0 \text{ menit}$) dengan suhu pasir sebesar $325,25^\circ \text{C}$, energi yang tersimpan mencapai sekitar 3,54 MJ. Seiring berjalannya waktu, energi ini mengalami penurunan secara bertahap seiring turunnya suhu pasir. Misalnya, pada menit ke-60 dengan suhu pasir $275,5^\circ \text{C}$, energi yang tersisa masih sekitar 2,94 MJ, sedangkan pada menit ke-120 dengan suhu pasir $179,25^\circ \text{C}$, energi yang tersisa menurun menjadi sekitar 1,79 MJ. Pada menit ke-210, ketika suhu pasir telah mencapai suhu acuan $30,5^\circ \text{C}$, energi panas yang tersimpan sudah habis atau mendekati 0 MJ. Hal ini menunjukkan bahwa pasir silika memiliki kemampuan menyimpan panas yang cukup besar dan melepaskannya secara bertahap, dan menjaga suhu ataupun energi yang disimpan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai media penyimpanan energi termal dalam sistem penyimpanan panas pada media pasir silika berbasis energi surya.

5.3.3 Pengukuran dan Pengujian Transfer Udara dari Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber *Heater* dari Sistem Panel Surya ke Kotak Penyimpanan Panas

Transfer Udara Dari Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber Heater dari Sistem Panel Surya Ke Kotak			
No	Waktu (menit)	Suhu Pasir (C)	Suhu Kotak (C)
1	0	325,25	31,75
2	10	249,75	34,25
3	20	198,25	42,25
4	30	153,5	51,25

5	40	98,25	58,25
6	50	86,5	66
7	60	69	74
8	70	53,25	81
9	80	44,5	87,75
10	90	38	91,5
11	100	35,5	94,5
12	110	33,25	98,25
13	120	31	101,75
14	130	31	81,75
15	140	31	65,5
16	150	31	48,75
17	160	31	40
18	170	31	31

Tabel 5. 4 Transfer Udara dari Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber *Heater* dari Sistem Panel Surya ke Kotak Penyimpanan Panas



Gambar 5. 6 Grafik Transfer Udara dari Penyimpanan Panas pada Media Pasir Silika Setelah Pemutusan Sumber *Heater* dari Sistem Panel Surya ke Kotak Penyimpanan Panas

Berdasarkan hasil pengujian transfer panas menggunakan blower dari media

pasir silika ke dalam kotak, dapat diamati bahwa proses perpindahan energi termal berlangsung sesuai prinsip perbedaan temperatur sebagai pendorong utama. Suhu awal pasir silika yang mencapai 325 °C secara bertahap menurun hingga stabil pada 31 °C setelah 120 menit, menandakan energi panas telah dilepaskan. Pada saat yang sama, suhu kotak yang awalnya berada pada 31,75 °C meningkat hingga mencapai puncak sebesar 101,75 °C pada menit ke-120.

- Massa pasir silika, $m = 15 \text{ kg}$
- Kapasitas panas (C_p) = 800 J/Kg
- Volume Kotak = $30 \times 30 \times 30 \text{ cm} = 27000 \text{ cm}^3 = 0,027 \text{ m}^3$
- Massa udara dalam kotak $m_{\text{udara}} = \rho_{\text{udara}} \cdot V$
 $V = 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 0,027 \text{ m}^3 = 0,0324 \text{ kg}$
- Kapasitas Udara ($C_{p \text{ udara}}$) = 1005 J/Kg
- Efisiensi η pada tiap waktu didefinisikan

$$\eta(t) = \frac{Q_{\text{kotak}}(t)}{|Q_{\text{pasir}}(t)|} \times 100\%$$

Hasil efisiensi transfer udara dari media pasir ke kotak

Interval (min)	ΔT_{sand} (°C)	Q_{sand} (J)	ΔT_{box} (°C)	Q_{box} (J)	Efisiensi (%)
0–10	75.50	939,975.0	2.50	81.4050	0.00866
10–20	51.50	641,175.0	8.00	260.4960	0.04063
20–30	44.75	557,137.5	9.00	293.0580	0.05260
30–40	55.25	687,862.5	7.00	227.9340	0.03314
40–50	11.75	146,287.5	7.75	252.3555	0.17251
50–60	17.50	217,875.0	8.00	260.4960	0.11956
60–70	15.75	196,087.5	7.00	227.9340	0.11624
70–80	8.75	108,937.5	6.75	219.7935	0.20176
80–90	6.50	80,925.00	3.75	122.1075	0.15089
90–100	2.50	31,125.00	3.00	97.6860	0.31385

Interval (min)	ΔT_{sand} (°C)	Q_{sand} (J)	ΔT_{box} (°C)	Q_{box} (J)	Efisiensi (%)
100–110	2.25	28,012.50	3.75	122.1075	0.43590
110–120	2.25	28,012.50	3.50	113.9670	0.40684
120–130	0.00	0.00	–20.00	–651.2400	-
130–140	0.00	0.00	–16.25	–529.1325	-
140–150	0.00	0.00	–16.75	–545.4135	-
150–160	0.00	0.00	–8.75	–284.9175	-
160–170	0.00	0.00	–9.00	–293.0580	-

Tabel 5. 5 Hasil efisiensi transfer udara dari media pasir ke kotak

Dengan catatan : untuk efisiensi saat $Q_{\text{sand}}=0$ dimana tidak ada energi dilepas pasir, namun udara di kotak masih melepaskan panas ke lingkungan. Nilai ΔQ kotak sangat kecil karena massa udara di dalam kotak sangat kecil oleh karena itu energi yang diterima udara tampak kecil dibanding energi yang dilepas pasir.

Berdasarkan hasil perhitungan energi panas, media pasir silika dengan massa 15 kg dan kapasitas panas spesifik 800 J/kg·K memiliki kemampuan menyimpan energi yang sangat besar. Pada saat suhu awal pasir mencapai 325,25 °C, energi termal yang tersimpan secara bertahap dilepaskan seiring penurunan suhu. Energi yang hilang dari pasir dihitung hingga mencapai sekitar –3765 kJ setelah 170 menit. Sementara itu, energi yang diterima udara di dalam kotak dengan volume 0,027 m³ dan massa 0,0324 kg relatif kecil, yaitu hanya mencapai sekitar 2,28 kJ pada suhu tertinggi 101,75 °C.