

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Hasil Penelitian

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan pembahasan mengenai kinerja *Thermal Energy Storage* (TES) berbasis *Phase Change Material* (PCM) parafin pada variasi temperatur dan volume air. Pengujian dilakukan pada tiga variasi temperatur, yaitu 60°C, 70°C, dan 80°C, serta dua variasi volume air, yaitu 2,5 L dan 5 L dengan debit aliran konstan sebesar 54,7 mL/s.

Pembahasan pada bab ini disusun untuk menjawab rumusan masalah penelitian, yaitu menganalisis pengaruh variasi temperatur, pengaruh variasi volume air, serta menentukan kombinasi variasi temperatur dan volume air yang menghasilkan kinerja *Thermal Energy Storage* paling optimal. Analisis dilakukan berdasarkan parameter perpindahan panas, perubahan temperatur PCM, energi yang diserap PCM, serta waktu pengujian pada setiap variasi.

Uraian pembahasan diawali dengan analisis parameter perpindahan panas, kemudian dilanjutkan dengan pembahasan pengaruh variasi temperatur, pengaruh variasi volume air, dan diakhiri dengan analisis penentuan kombinasi variasi terbaik berdasarkan hasil pengujian.

B. Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Kinerja Thermal Energy Storage

1. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida selama proses pengujian. Hasil perhitungan bilangan Reynolds pada setiap variasi temperatur disajikan pada Tabel 1.

Variasi Temperatur	Reynolds Number
60	18826
70	21641
80	24484

Tabel 1 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds pada Variasi Temperatur

Berdasarkan Tabel 1, nilai bilangan Reynolds meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur fluida. Nilai Reynolds pada temperatur 60°C sebesar 18.826, kemudian meningkat menjadi 21.641 pada temperatur 70°C dan 24.484 pada temperatur 80°C. Seluruh nilai tersebut menunjukkan bahwa aliran fluida berada pada kondisi turbulen (Re

> 4.000). Kondisi ini mendukung proses perpindahan panas dari fluida menuju PCM sehingga variasi temperatur memberikan pengaruh terhadap karakteristik aliran selama proses pengujian.

2. Bilangan Prandtl

Nilai bilangan Prandtl pada penelitian ini diperoleh berdasarkan tabel sifat termofisika air yang dikemukakan oleh Çengel dan Boles (dalam terjemahan Pak Yunus). Nilai tersebut ditentukan sesuai dengan temperatur fluida yang digunakan pada masing-masing variasi pengujian. Hasil penentuan bilangan Prandtl disajikan pada Tabel 4.2.

Variasi Temperatur	Prandtl Number
60	2,99
70	2,55
80	2,22

Tabel 2 Nilai Bilangan Prandtl Air pada Variasi Temperatur.

Berdasarkan Tabel 2, nilai bilangan Prandtl pada temperatur 60°C sebesar 2,99, kemudian menurun menjadi 2,55 pada temperatur 70°C, dan 2,22 pada temperatur 80°C. Penurunan nilai tersebut menunjukkan bahwa sifat termofisika air berubah seiring meningkatnya temperatur. Nilai bilangan Prandtl ini selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam perhitungan bilangan Nusselt dan koefisien perpindahan panas konveksi.

From Çengel and Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, Ed. 3, McGraw-Hill, 2014.

942 PROPERTY TABLES AND CHARTS														
TABLE A-3 Properties of saturated water														
Temp. <i>T</i> , °C	Saturation Pressure <i>P</i> _{sat} , kPa	Density ρ , kg/m ³		Enthalpy of Vaporization <i>h</i> _{fg} , kJ/kg	Specific Heat <i>c_p</i> , J/kg·K		Thermal Conductivity <i>k</i> , W/m·K		Dynamic Viscosity μ , kg/m·s		Prandtl Number <i>Pr</i>		Volume Expansion Coefficient β , 1/K	Surface Tension, N/m
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}	0.0756
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}	0.0749
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}	0.0742
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}	0.0735
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}	0.0727
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}	0.0720
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}	0.0712
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}	0.0704
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}	0.0696
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}	0.0688
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}	0.0679
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}	0.0671
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}	0.0662
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}	0.0654
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}	0.0645
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}	0.0636
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}	0.0627
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}	0.0617
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}	0.0608

Gambar 1 Potongan tabel sifat termofisika air menurut Çengel dan Cimbala (2014) yang digunakan dalam penentuan parameter penelitian.

Gambar 1 menunjukkan potongan tabel sifat termofisika air yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan nilai konduktivitas termal, viskositas dinamis, massa jenis, kalor jenis, dan bilangan Prandtl sesuai temperatur pengujian.

3. Konduktivitas Termal Fluida (k)

Nilai konduktivitas termal fluida pada penelitian ini diperoleh berdasarkan tabel sifat termofisika air yang dikemukakan oleh Çengel dan Cimbala (2014). Nilai tersebut ditentukan sesuai dengan temperatur fluida pada masing-masing variasi pengujian. Hasil penentuan nilai konduktivitas termal disajikan pada Tabel 3.

Variasi Temperatur	Konduktivitas Termal Fluida (k)
60	0,654
70	0,663
80	0,67

Tabel 3 Nilai Konduktivitas Termal Fluida pada Variasi Temperatur.

Berdasarkan Tabel 3, nilai konduktivitas termal fluida mengalami peningkatan seiring bertambahnya temperatur. Pada temperatur 60°C nilai konduktivitas termal sebesar 0,654 W/m·K, kemudian meningkat menjadi 0,663 W/m·K pada temperatur 70°C dan 0,670 W/m·K pada temperatur 80°C. Nilai konduktivitas termal tersebut digunakan sebagai salah satu parameter dalam perhitungan bilangan Nusselt dan koefisien perpindahan panas konveksi.

4. Bilangan Nusselt

Nilai bilangan Nusselt pada penelitian ini dihitung berdasarkan korelasi aliran turbulen di dalam pipa dengan menggunakan nilai bilangan Reynolds dan bilangan Prandtl yang telah diperoleh sebelumnya. Hasil perhitungan bilangan Nusselt pada setiap variasi temperatur disajikan pada Tabel 4.

Variasi Temperatur	Nusselt Number
60	83,9282
70	89,5119
80	94,7721

Tabel 4 Hasil Perhitungan Bilangan Nusselt.

Berdasarkan Tabel 4, nilai bilangan Nusselt mengalami peningkatan seiring bertambahnya temperatur fluida. Pada temperatur 60°C diperoleh nilai Nusselt sebesar 83,9282, kemudian meningkat menjadi 89,5119 pada temperatur 70°C, dan mencapai 94,7721 pada temperatur 80°C. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan perpindahan panas secara konveksi dari fluida menuju dinding pipa semakin baik pada temperatur yang lebih tinggi.

5. Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (h)

Nilai koefisien perpindahan panas konveksi dihitung berdasarkan nilai bilangan Nusselt dan konduktivitas termal fluida. Hasil perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi pada setiap variasi temperatur disajikan pada Tabel 5.

Variasi Temperatur	Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (h)
60	7037,0567
70	7608,5115
80	8140,6803

Tabel 5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Konveksi.

Berdasarkan Tabel 5, nilai koefisien perpindahan panas konveksi mengalami peningkatan pada setiap kenaikan temperatur. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 7.037,0567 W/m²·K pada temperatur 60°C, meningkat menjadi 7.608,5115 W/m²·K pada temperatur 70°C, dan mencapai 8.140,6803 W/m²·K pada temperatur 80°C. Peningkatan nilai tersebut menunjukkan bahwa perpindahan panas dari fluida menuju dinding pipa berlangsung semakin efektif pada temperatur yang lebih tinggi.

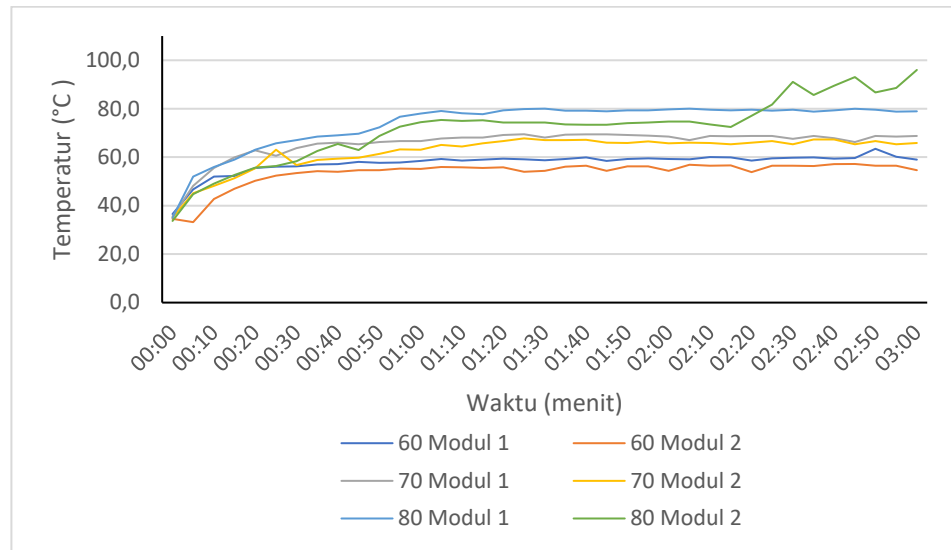
C. Pengaruh Variasi Volume Air terhadap Kinerja Thermal Energy Storage

Setelah dilakukan analisis pengaruh variasi temperatur terhadap kinerja *Thermal Energy Storage* (TES), pembahasan selanjutnya difokuskan pada pengaruh variasi volume air sebagai fluida kerja terhadap kinerja sistem. Pada penelitian ini digunakan dua variasi volume air, yaitu 2,5 L dan 5 L, sedangkan temperatur fluida dijaga tetap pada masing-masing kondisi pengujian, yaitu 60°C, 70°C, dan 80°C. Analisis terhadap variasi volume air dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi temperatur PCM, energi yang diserap PCM, serta

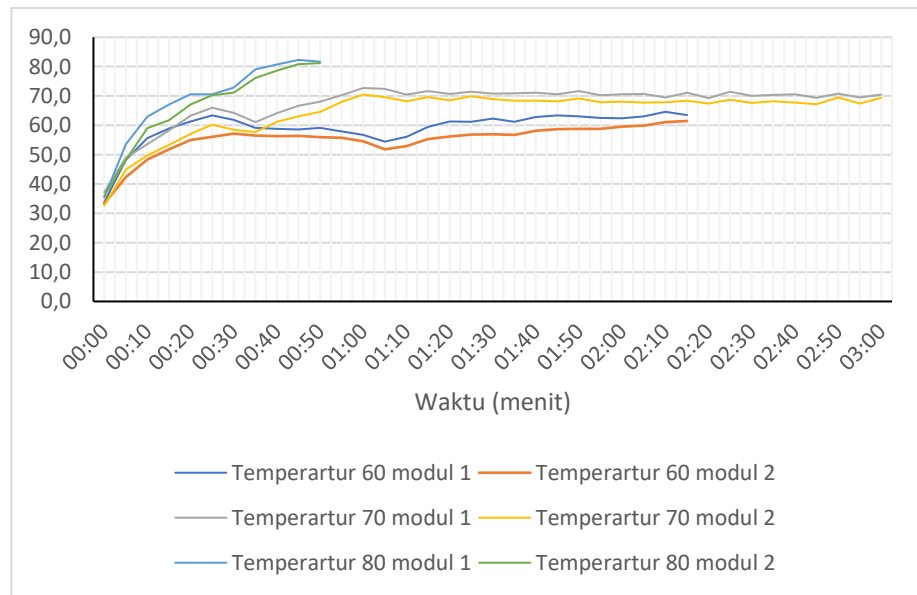
waktu yang dibutuhkan selama proses penyimpanan energi panas berlangsung. Hasil analisis tersebut disajikan pada subbab berikut.

1. Distribusi Temperatur PCM

Distribusi temperatur PCM digunakan untuk mengetahui perubahan temperatur selama proses penyimpanan energi panas pada setiap variasi temperatur pengujian. Temperatur yang digunakan merupakan temperatur rata-rata setiap modul yang diperoleh dari hasil perataan tiga titik pengukuran pada masing-masing modul.



Gambar 2 Menunjukkan hubungan temperatur PCM terhadap waktu pada volume air 2,5 L.



Gambar 3 Menunjukkan hubungan temperatur PCM terhadap waktu pada volume air 5 L .

Berdasarkan kedua grafik tersebut terlihat bahwa temperatur PCM pada seluruh variasi pengujian mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu. Selain itu, semakin tinggi temperatur fluida yang digunakan, laju kenaikan temperatur PCM juga semakin cepat.

Meskipun terdapat sedikit perbedaan temperatur antara Modul 1 dan Modul 2, pola kenaikan temperatur pada kedua modul menunjukkan kecenderungan yang serupa. Hal ini menunjukkan bahwa panas dari fluida berhasil didistribusikan menuju PCM pada kedua modul selama proses pengujian.

2. Hasil Perhitungan Energi yang Diserap PCM pada Setiap Variasi Pengujian

Energi yang diserap PCM pada setiap variasi pengujian diperoleh dari hasil perhitungan kalor sensibel padat, kalor laten, kalor sensibel cair, dan energi total. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.6 untuk mengetahui pengaruh variasi volume air terhadap kemampuan *Thermal Energy Storage* dalam menyimpan energi panas.

Q Solid		Q Melting		Q Liquid		Q Total Modul 1	Q Total Modul 2	Q Total
Modul 1	Modul 2	Modul 1	Modul 2	Modul 1	Modul 2			
201,1	225,4	145,3	37,9	0,0	0,0	346,4	263,3	609,7
213,3	218,1	292,8	292,8	34,9	8,2	541,0	519,1	1060,1
219,3	235,1	292,8	292,8	132,3	295,6	644,5	823,5	1468,0
233,9	240,0	255,2	206,4	0,0	0,0	489,1	446,4	935,5
192,6	248,5	292,8	292,8	51,2	41,6	536,6	582,9	1119,5
214,5	208,4	292,8	292,8	159,1	154,3	666,4	655,5	1321,9

Tabel 6 Hasil perhitungan Qs, Qm, Ql dan Qt pada semua variasi pengujian.

Berdasarkan Tabel 6, diperoleh nilai kalor sensibel padat, kalor laten, kalor sensibel cair, dan energi total pada setiap variasi temperatur dan volume air. Perbedaan nilai pada setiap komponen menunjukkan bahwa variasi volume air memengaruhi proses penyerapan energi oleh PCM selama proses pemanasan berlangsung.

Energi total merupakan akumulasi dari kalor sensibel padat, kalor laten, dan kalor sensibel cair sehingga digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi kemampuan penyimpanan energi pada PCM. Oleh karena itu, pembahasan difokuskan pada energi total untuk membandingkan kinerja *Thermal Energy Storage* pada setiap variasi volume air.

Dari keseluruhan komponen energi tersebut, energi total digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi kemampuan penyimpanan energi pada PCM karena

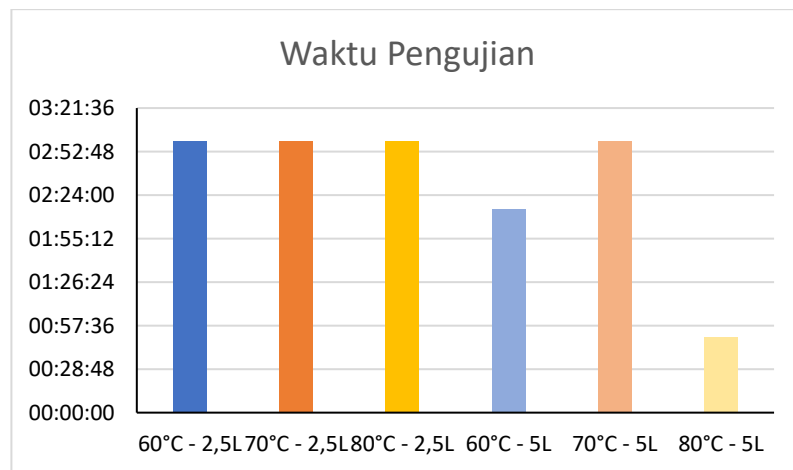
merupakan akumulasi dari kalor sensibel padat, kalor laten, dan kalor sensibel cair. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai energi total berbeda pada setiap variasi temperatur dan volume air.

3. Waktu Pengujian

Hasil pengukuran lama waktu pengujian pada setiap variasi temperatur dan volume air disajikan pada Tabel 7. Waktu pengujian menunjukkan lamanya proses penyimpanan energi panas yang dilakukan pada masing-masing variasi pengujian.

Variasi Pengujian	Waktu Pengujian
60°C - 2,5L	03:00:00
70°C - 2,5L	03:00:00
80°C - 2,5L	03:00:00
60°C - 5L	02:15:00
70°C - 5L	03:00:00
80°C - 5L	00:50:00

Tabel 7 Lama Waktu Pengujian pada Setiap Variasi Temperatur dan Volume Air.



Gambar 4 Diagram Lama Waktu Pengujian pada Setiap Variasi Temperatur dan Volume Air.

Berdasarkan Tabel 7 terlihat bahwa tidak seluruh variasi pengujian mencapai kondisi PCM cair sempurna sebelum batas maksimum pengujian selama 3 jam. Variasi 60°C–2,5 L, 70°C–2,5 L, 80°C–2,5 L, dan 70°C–5 L dihentikan pada batas maksimum pengujian karena PCM belum sepenuhnya mencapai kondisi cair sempurna. Sementara itu, variasi 60°C–5 L dan 80°C–5 L berhasil menyelesaikan proses pengujian sebelum batas waktu maksimum tercapai.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi temperatur dan volume air memengaruhi lama proses penyimpanan energi panas pada sistem *Thermal Energy Storage*. Oleh karena itu, parameter waktu pengujian digunakan sebagai parameter pendukung bersama energi total untuk menentukan kombinasi variasi temperatur dan volume air yang memberikan kinerja sistem paling optimal.

D. D. Analisis Penentuan Kombinasi Variasi Terbaik

Penentuan kombinasi variasi terbaik pada penelitian ini dilakukan berdasarkan dua parameter utama, yaitu energi total yang berhasil disimpan oleh Phase Change Material (PCM) dan waktu yang dibutuhkan selama proses pengujian. Kedua parameter tersebut digunakan secara bersamaan untuk memperoleh konfigurasi pengujian yang tidak hanya menghasilkan penyimpanan energi yang tinggi, tetapi juga memiliki waktu pengujian yang lebih efisien.

Berdasarkan hasil perhitungan energi total, variasi temperatur 80°C dengan volume air 2,5 L menghasilkan nilai energi terbesar, yaitu sebesar 1468,0 kJ. Namun, variasi tersebut memerlukan waktu pengujian hingga mencapai batas maksimum pengujian selama 3 jam sehingga proses penyimpanan energi berlangsung relatif lebih lama.

Sementara itu, variasi temperatur 80°C dengan volume air 5 L menghasilkan energi total sebesar 1321,9 kJ, atau sekitar 90% dari energi maksimum yang diperoleh pada penelitian ini. Meskipun nilai energi yang dihasilkan sedikit lebih rendah, proses pengujiannya hanya memerlukan waktu 50 menit, sehingga menunjukkan proses perpindahan panas yang berlangsung lebih cepat dibandingkan variasi lainnya.

Berdasarkan kedua parameter tersebut, variasi temperatur 80°C dengan volume air 5 L dipilih sebagai kombinasi variasi terbaik pada penelitian ini. Variasi tersebut mampu memberikan keseimbangan antara besarnya energi yang berhasil disimpan dan efisiensi waktu pengujian, sehingga menghasilkan kinerja *Thermal Energy Storage* yang lebih efektif dibandingkan variasi lainnya.