

Peningkatan Performa Termal *Phase Change Material* dengan Komposit Berbasis Parafin/*High-Density Polyethylene* Melalui Penambahan *Carbon Nanotube*

Dwi Rahmalina^{1*}, Isnaini Choirul², Ismail³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila
Srengseng Sawah, Jagakarsa-Jakarta Selatan, DKI Jakarta, Indonesia, 12640

*Corresponding author: drahmalina@univpancasila.ac.id

Abstract

Latent heat storage systems with phase change materials (PCM) are an effective way to use them. The PCM material attracting attention is paraffin because it has various advantages. However, the thermal conductivity value of this material is low, which causes the charging and discharging process to take a long time, which affects the power produced. This study used paraffin-based composite materials and SSPCM using HDPE as a shape stabilizer and then combined with variations of CNT as a thermal conductivity enhancer. The results were analyzed to obtain the optimal CNT addition composition for thermal storage applications. CNT variations are given at 0, 2, 4, 6, 8, 10 wt% then HDPE 20 wt% and paraffin 80% of the total mass after deducting CNT variations. Static test testing is carried out to determine the performance of the material. The addition of CNT proved to have a good effect on the performance of all samples. The increased value is not linear with the addition of CNT mass. The most optimal charging process is paraffin CNT 6% wt, with a power increase of 23% compared to paraffin. The use of HDPE has the effect of slowing down the average time by 5% in the charging process. In the discharging process, the most optimal performance improvement was found in the 10 wt% CNT SSPCM sample with a power increase of 16% compared to paraffin. The use of HDPE has the effect of accelerating the discharging time on average by 2% and minimizing the occurrence of the deposition process.

Keywords: Charging, Discharging, PCM CNT Composite, Thermal energy storage (TES)

Abstrak

Sistem penyimpanan panas *latent* dengan bahan perubahan fase (PCM) merupakan cara yang efektif digunakan. Bahan PCM yang menarik perhatian adalah parafin karena memiliki berbagai macam keunggulan namun, nilai konduktivitas termal bahan ini rendah yang menyebabkan waktu proses charging dan discharging menjadi lama sehingga berpengaruh pada daya yang dihasilkan. Dalam studi ini bahan komposit berbasis parafin dan SSPCM menggunakan HDPE sebagai *shape stabilized* digunakan lalu dikombinasikan dengan variasi CNT sebagai peningkat konduktivitas termal. Hasilnya dianalisis untuk mendapatkan komposisi penambahan CNT yang paling optimal pada aplikasi *thermal storage*. Variasi CNT diberikan sebesar 0, 2, 4, 6, 8, 10 wt% kemudian HDPE 20 wt% dan parafin 80% dari total massa setelah dikurangi variasi CNT. Pengujian *static test* dilakukan untuk mengetahui performa bahan. Penambahan CNT terbukti berpengaruh baik terhadap performa semua sampel. Nilai kenaikan tidak linier terhadap penambahan massa CNT. Proses *charging* paling optimal adalah parafin CNT 6% wt dengan peningkatan daya sebesar 23% dibandingkan parafin. Penggunaan HDPE memberikan efek perlambatan waktu rata rata sebesar 5% pada proses *charging*. Pada proses *discharging* peningkatan performa paling optimal terdapat pada sampel SSPCM CNT 10 wt% dengan kenaikan daya sebesar 16% dibandingkan parafin. Penggunaan HDPE memberikan efek percepatan waktu *discharging* rata rata sebesar 2% dan meminimalisasi terjadinya proses pengendapan.

Kata kunci: Charging, Discharging, Komposit PCM CNT, Thermal energy storage (TES)

1. Pendahuluan

Penipisan energi fosil berbasis karbon sangat signifikan pada satu dekade terakhir. Dampaknya adalah ketimpangan antara kebutuhan dengan energi yang dihasilkan [1]. Energi terbarukan menjadi salah satu potensi dalam pemenuhan kebutuhan. Salah satu energi terbarukan yang menarik

perhatian dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir adalah energi matahari, sebab penyebaran energi ini meningkat sehingga berdampak pada bertambahnya produksi secara global [2]. Teknik pemanfaatan energi matahari di Indonesia sebagian besar masih menggunakan dengan cara langsung contohnya untuk pengering ikan, hasil pertanian, pemanas air dan yang terbesar

untuk pengering pakaian [3]. Pengembangan aplikasi alat pemanfaatan energi panas sudah cukup banyak seperti penggunaan lemari pengering yang konsepnya menggunakan perpindahan panas secara konveksi dengan aliran fluida rendah yang terbukti efektif untuk pengeringan [4]. Namun pemanfaatan energi panas secara langsung memiliki kendala yaitu kurang fleksibelnya pada waktu penggunaan contohnya ketika malam hari ataupun hari hujan maka energi tersebut tidak dapat digunakan sehingga dibutuhkan teknologi untuk menyimpan energi panas yang memiliki kemampuan andal.

Para peneliti memberi perhatian yang besar terhadap teknologi penyimpanan energi karena mampu menjawab masalah mengenai ketimpangan energi dan memberi peningkatan efisiensi serta pemanfaatan energi [5]. *Thermal energy storage* (TES) dianggap sebagai sistem penyimpanan energi inovatif yang dapat diterapkan baik untuk aplikasi skala kecil ataupun besar [6]. Terdapat juga penyimpanan panas dengan sistem multistage yaitu beberapa drum penyimpanan disusun dengan rancangan suhu yang bertahap sehingga dalam satu proses mampu menghasilkan peningkatan keefektifan daya pada pengisian [7]. Pengaplikasian teknologi penyimpanan panas ini berkembang pesat di Eropa dalam kurun beberapa tahun terakhir, contohnya sebagai penyimpanan air panas bertekanan di Ulm Jerman, Penyimpanan air panas tanpa tekanan di Potsdam Germany, Penyimpanan air panas musiman di Ackermannbogen Jerman, penyimpanan salju di Chitose Airport, penyimpanan salju musiman di Swedia dll [8].

Penyimpanan energi panas ini diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu penyimpanan panas *sensible*, *latent*, dan termokimia. Penyimpanan panas *sensible* (SHS) adalah penyimpanan panas yang memanfaatkan kapasitas panas dan perubahan suhu material [9]. Penyimpanan panas ini tidak disertai perubahan fase material ketika melakukan penyimpanan.

Pada penyimpanan panas laten (LHS), proses penyimpanan panas disertai dengan perubahan fase material. Kemudian, pada aplikasi penggunaannya, LHS diklasifikasikan menjadi dua, yaitu penyimpanan aktif dan pasif. Penyimpanan panas pasif penggunaannya tanpa menggunakan alat penukar panas atau mekanisme proses kerjanya hanya berasal dari perbedaan suhu saja [10]. Sementara itu, penyimpanan panas aktif menggunakan sistem yang lebih kompleks, seperti penggunaan alat penukar panas dan mekanismenya [11]. Contoh pengaplikasian penyimpanan panas pasif terdapat pada bangunan, seperti pengkombinasian bahan dinding bangunan, langit-langit, ataupun lantai, [12] sedangkan untuk penyimpan panas aktif pengaplikasiannya adalah sebagai pemanas ruangan.

Istilah untuk bahan penyimpan panas *latent* (LHS) adalah *phase change material* (PCM). Material yang umum digunakan adalah garam cair, lilin parafin, dan bahan air/es [13]. PCM sangat menarik karena memiliki kepadatan energi yang tinggi serta kemampuan menyimpan entalpi panas pada rentang waktu pendek sehingga mudah dipergunakan pada saat pengaplikasiannya [14]. Salah satu bahan PCM yang menarik perhatian adalah parafin karena memiliki berbagai macam kelebihan, seperti memiliki entalpi yang tinggi, harganya murah, tersedia dalam jumlah besar, serta tidak korosif untuk berbagai tempat penyimpanan [15]. Namun, parafin memiliki karakteristik yang tidak diharapkan, yaitu konduktivitas termal yang rendah ($\pm 0,2$ W/m.K) [16], laju perpindahan panas yang rendah, serta tidak stabil pada *phase transition* yang sangat berkorelasi pada berkurangnya efisiensi [17], serta masalah lain berupa penurunan kapasitas termal ketika dilakukan pemakaian secara berulang lebih dari 1.000 kali [18]. Kelemahan pada bahan parafin tersebut menyebabkan terbatasnya aplikasi serta penggunaannya, terutama masalah penyimpanan dan pelepasan panas yang rendah [1].

Para peneliti berlomba meminimalisasi sifat parafin yang tidak diinginkan sebagai bahan penyimpan panas. Penambahan *metal foam* atau penambahan mikro/nano logam dan oksidanya terbukti mampu meningkatkan konduktivitas termal bahan PCM [19]. Pada penambahan *metal foam* bentuk mikrostruktur mempengaruhi nilai dari konduktivitas termal namun peningkatan konduktivitas termal masih terbatas pada lintasan yang dilalui *foam* [20]. Pembuatan komposit dengan menggunakan bahan mikro dari abu vulkanis terbukti memberikan efek yang signifikan sampai 19,59 W/ m.K ketika dikombinasikan dengan perbandingan 1:1. Namun, hal ini memberikan dampak pada aglomerasi dan juga kapasitas penyimpanan panas [21]. Serupa dengan abu vulkanis penambahan bahan mikro yang lainnya terbukti memberikan efek peningkatan konduktivitas termal namun memberikan efek adanya pengendapan [22]. Akan tetapi, masalah tersebut bisa diminimalisasi dengan memperkecil ukurannya menjadi ukuran nano. Bahan nanopartikel berbasis karbon dapat dijadikan sebagai bahan alternatif selain nanopartikel logam. Pada beberapa penelitian yang telah dilakukan, terbukti bahan karbon ini memberikan peningkatan nilai konduktivitas termal bahan. Salah satu bahan nano berbasis karbon adalah karbon nanotube (CNT). Bahan ini memiliki nilai konduktivitas termal sebesar 2000-6000 W/ m.K [23]. Nilai tersebut adalah nilai yang tinggi dibandingkan dengan sebagian besar bahan nano berbasis logam. Bahan CNT ini memiliki kepadatan yang rendah sehingga memiliki kemampuan dispersi yang baik [24].

Sifat parafin lain yang tidak diharapkan sebagai bahan penyimpan panas adalah ketidakstabilan suhu ketika transisi dan penurunan kapasitas termal setelah dilakukan penggunaan berulang lebih dari 1000 kali. Kehilangan energi ketika transisi fase dapat diminimalkan dengan membuat komposit PCM dengan cara menggabungkannya bersama polimer

sehingga membentuk *shape stabilize phase change material* (SSPCM) [5]. *High-density polyethylene* (HDPE) dan *styrene-butadiene-styrene* (SBS) direkomendasikan sebagai bahan pendukung karena memiliki kompatibilitas yang baik dengan parafin, murah, dan mudah diproduksi [25], [26]. Selain berfungsi sebagai menstabilkan, bahan *polymer* ini juga terbukti mampu meningkatkan sifat termal dan mekanik dari bahan parafin murni [27]. Penelitian baru-baru ini mendapatkan penambahan 20% berat HDPE pada parafin yang merupakan penambahan optimal, kemudian bahan SSPCM tersebut dilakukan pengujian siklus termal yang sebenarnya dan menghasilkan fusi panas parafin / HDPE 2,9 %, sedangkan parafin sebesar 8,7 % setelah 5.000 siklus [18]. Metode penambahan HDPE ini sebagai salah satu solusi sebagai penstabil tanpa meningkatkan biaya yang signifikan. Selain itu, dapat digunakan sebagai solusi jangka panjang dalam mengatasi penurunan kapasitas termal.

Banyak bahan yang digunakan sebagai PCM tapi yang menarik perhatian dan memiliki berbagai keunggulan adalah parafin, namun bahan tersebut memiliki kelemahan yaitu konduktivitas bahan yang kurang baik sehingga berdampak pada sedikitnya daya yang dihasilkan. Penambahan CNT pada bahan PCM maupun SSPCM dengan HDPE sebagai *shape stabilized* pada aplikasi *thermal storage* dianggap tepat, karena sangat berpotensi mampu meningkatkan daya yang dihasilkan. Namun tidak adanya acuan kadar CNT yang ditambahkan, serta efek dari setiap penambahan terhadap PCM maupun SSPCM dan berakibat pada ketidakefektifan dalam penambahan yang berefek pada biaya serta daya yang dihasilkan. Variasi kadar CNT ditambahkan pada bahan PCM maupun SSPCM kemudian di analisis untuk mendapatkan nilai paling optimum.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen dengan menggunakan teknik *static test*. Bahan

utama yang dipergunakan adalah parafin HDPE *commercial grade* yang tersedia di pasaran. Parafin tersebut memiliki nilai *Melting point* pada suhu 61,6 °C dan *freezing temperature* pada suhu 74,2 °C. Bahan penstabil yang dipergunakan untuk bahan SSPCM adalah HDPE dengan nilai *Melting point* pada suhu 109,8 °C dan *freezing temperature* pada suhu 121,6 °C. Bahan terakhir sekaligus bahan terpenting yang dipergunakan sebagai upaya peningkatan konduktivitas termal adalah CNT dengan nilai *Melting point* 525 °C.

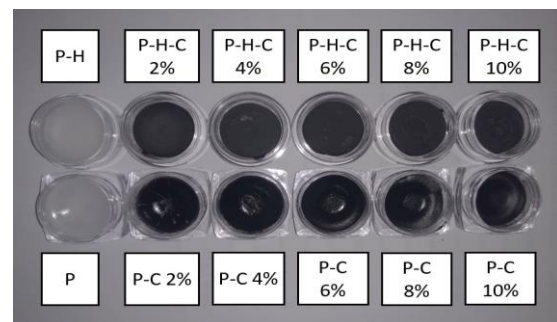
Pada penelitian ini komposisi HDPE 20 wt% dipergunakan, angka tersebut diambil dari referensi [18]. Nilai tersebut dianggap nilai terbaik dengan kelebihan tidak berpengaruh signifikan pada kapasitas penyimpanan, meminimalisasi efek *supercooling*, dan penurunan fusi panas yang lebih sedikit ketika dipergunakan secara berulang. Bahan CNT pada penelitian ini dibatasi maksimal sebesar 10 wt% sebab nilai tersebut tidak berpengaruh besar terhadap kapasitas penyimpanan serta efisiensi biaya.

Tabel 1. Komposisi sampel yang disiapkan

No	Nama Sampel	Komposisi
1	P	Parafin 100 wt%
2	P-C 2%	Parafin 98,0 wt% + CNT 2,0 wt%
3	P-C 4%	Parafin 96,0 wt% + CNT 4,0 wt%
4	P-C 6%	Parafin 94,0 wt% + CNT 6,0 wt%
5	P-C 8%	Parafin 92,0 wt% + CNT 8,0 wt%
6	P-C 10%	Parafin 90,0 wt% + CNT 10,0 wt%
7	P-H	Parafin 80,0 wt% + HDPE 20 wt%
8	P-H-C 2%	Parafin 78,4 wt% + HDPE 19,6 wt% + 2,0 CNT wt%
9	P-H-C 4%	Parafin 76,8 wt% + HDPE 19,2 wt% + 4,0 CNT wt%
10	P-H-C 6%	Parafin 75,2 wt% + HDPE 19,2 wt% + 6,0 CNT wt%
11	P-H-C 8%	Parafin 73,6 wt% + HDPE 18,4 wt% + 8,0 CNT wt%
12	P-H-C 10%	Parafin 72,0 wt% + HDPE 18,0 wt% + 10,0 CNT wt%

Pada penelitian ini digunakan 6 rasio kadar CNT yang berbeda yaitu 0, 2, 4, 6, 8 dan 10 wt%. Sampel dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu PCM parafin CNT sebanyak enam variasi, lalu SSPCM parafin HDPE CNT sebanyak enam variasi menghasilkan total 12 sampel.

Proses pembuatan sampel dengan cara melelehkan parafin dengan pemanas listrik pada suhu 130 °C, kemudian ditambahkan CNT secara perlahan dengan variasi yang ditetapkan. Proses pengadukan dilakukan setiap sepuluh detik sekali selama sepuluh menit. Untuk kelompok dua, secara bersamaan bahan HDPE dan parafin dipanaskan hingga suhu 130 °C, kemudian aduk hingga merata kurang lebih selama lima menit, lalu ditambahkan variasi CNT dan lakukan pengadukan kembali selama sepuluh menit. Setelah proses selesai, tuangkan sampel ke dalam wadah uji, lalu dilakukan pendinginan selama lima jam. Sampel dengan massa 15 gr untuk *static test* siap digunakan.

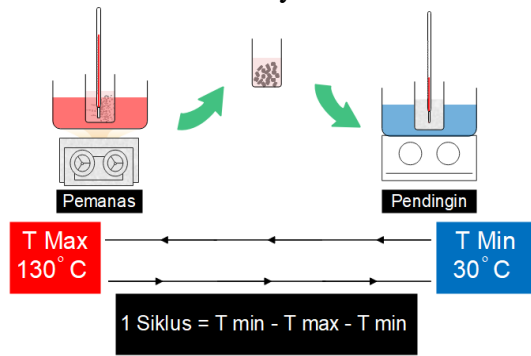


Gambar 1. Penampakan hasil sampel

Pada pengujian ini menggunakan sistem *Passive Latent Heat Storage System*. Pada sistem ini perpindahan panas tanpa menggunakan fluida kerja sebagai media perpindahannya sehingga tidak membutuhkan alat penukar kalor. Teknik yang digunakan adalah *static test*, yaitu dengan cara memanaskan sampel dari suhu minimal sampai suhu maksimal, kemudian hasilnya dicatat dalam sebuah grafik suhu – waktu sehingga dapat dianalisis seperti skema pada Gambar 2.

Suhu minimum pada penelitian ini adalah 30 °C yang merupakan suhu ruang dan suhu awal sampel. Kemudian, suhu maksimum penelitian ini diambil 130 °C. Nilai ini diambil sebagai keamanan ketika melakukan pengukuran karena merupakan 65% dari titik nyala parafin yang merupakan bahan dengan masa terbesar sehingga memiliki potensi mudah menyala

setelah melewati titik nyala bahan tersebut.



Gambar 2. Skema Uji Static

Pengujian *static test* dilakukan terhadap 2 kelompok dengan jumlah 12 sampel dengan variasi CNT berbeda. Pengujian dilakukan secara individual. Proses pengujian dibagi menjadi dua yaitu *charging* dan *discharging*. Proses *charging* adalah proses pemanasan dari suhu ruang, yaitu 30 °C yang diasumsikan dengan 0% kapasitas penyimpanan sampai 130 °C yang diasumsikan sebagai 100% penyimpanan.

Pemanasan dilakukan menggunakan pemanas listrik dengan media fluida minyak goreng sebagai pembantu proses perpindahan panas sehingga wadah yang berisi sampel mendapatkan panas yang merata. Setelah sudah mencapai suhu 130 °C (100%) pengisian, wadah dipindahkan ke dalam ruang pendingin. Proses ini disebut dengan proses *discharging*. Suhu sampel yang mula-mula 130 °C didiamkan hingga mencapai suhu ruang, yaitu 30 °C. Pada semua proses tersebut disematkan sebanyak tiga buah termokopel tipe K pada sampel yang tersambung pada datalogger yang terkoneksi dengan komputer sehingga dapat memantau perubahan suhu terhadap waktu setiap 30 detik. Hasil dari pengukuran tersebut disajikan pada sebuah grafik perubahan suhu terhadap waktu.

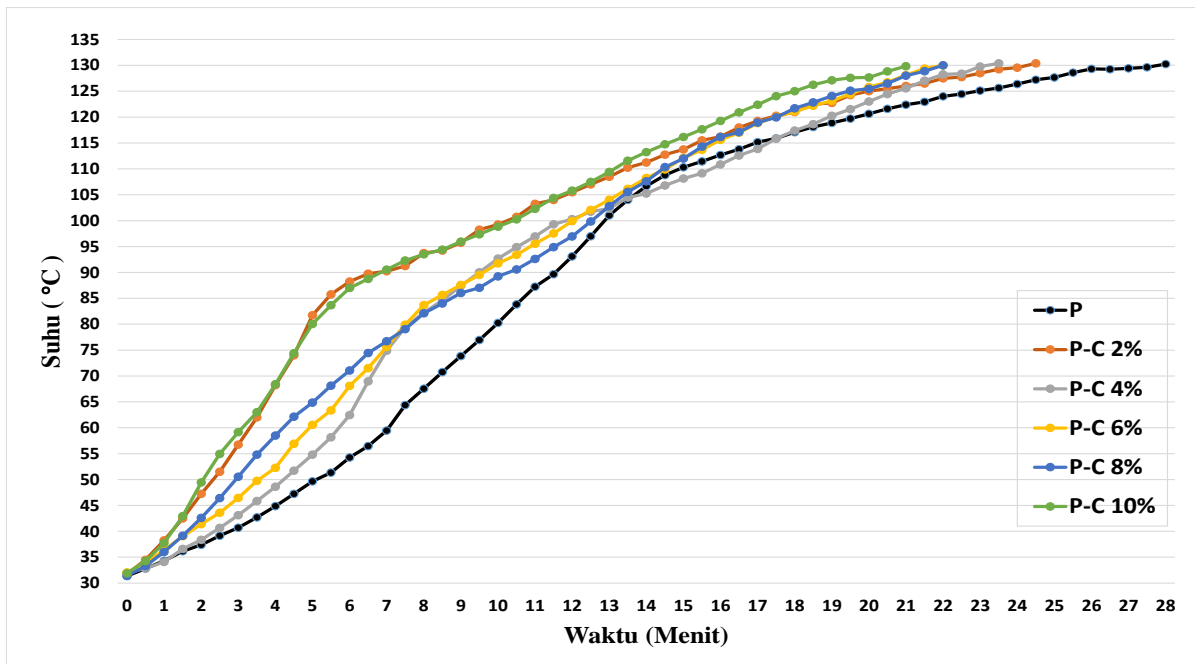
3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan gambar uji *static test*

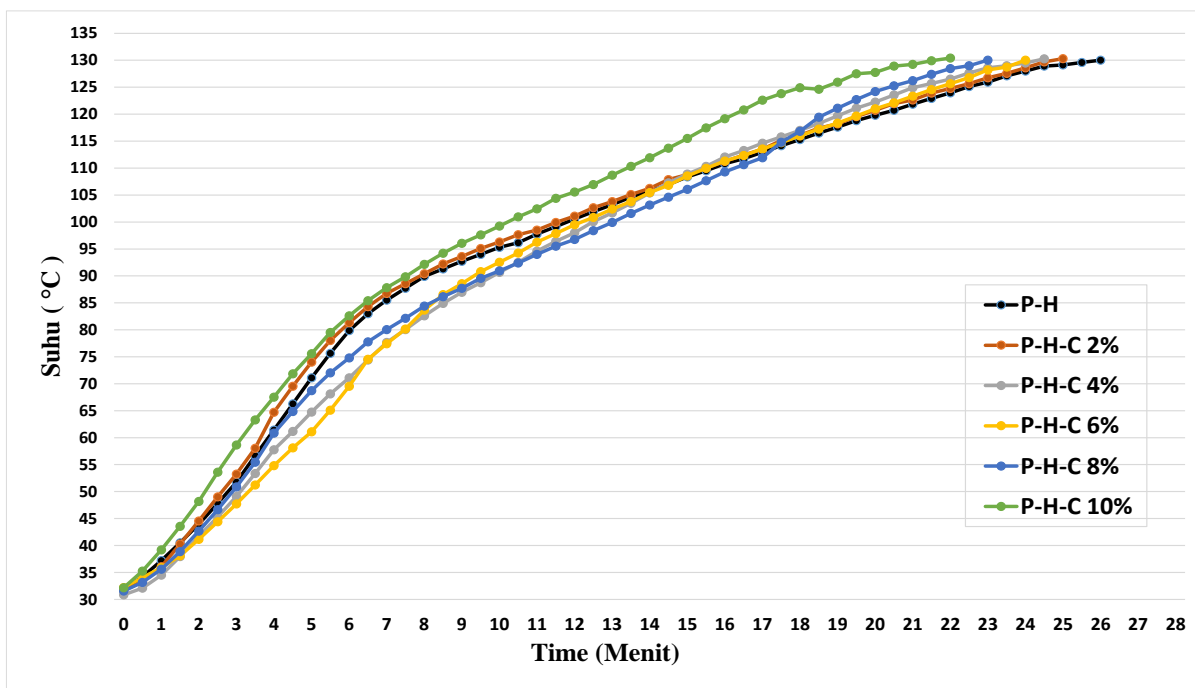
charging komposit PCM dan SSPCM yang di plot pada Gambar 3 dan Gambar 4 secara berturut-turut. Sampel parafin mendapatkan durasi paling lama pada proses pengisian yaitu yaitu 28 menit. Ini mengartikan bahwa bahan tanpa campuran CNT memiliki nilai konduktivitas termal terendah. Nilai konduktivitas termal parafin adalah 0,214 W/m.k. Penambahan CNT berpengaruh baik terhadap komposit PCM maupun SSPCM sebab nilai konduktivitas termal yang tinggi dari CNT membuat konduktivitas bahan menjadi naik. Peningkatan nilai konduktivitas termal berdampak pada waktu proses *charging* menjadi semakin singkat sehingga mampu meningkatkan durasi siklus.

Tahapan proses pengisian PCM maupun SSPCM secara umum terdiri dari tiga tahapan. Pertama adalah *solid sensibel*. Yang kedua adalah *solid-liquid transition phase*. Lalu, yang terakhir adalah *liquid sensibel* hingga status persen pengisian yaitu suhu 130 °C. Pada proses pengisian terjadi peningkatan suhu yang sangat cepat ketika fase solid sensibel baik pada PCM maupun SSPCM yang terjadi pada kisaran suhu 30 °C sampai kisaran 61,6 °C. penyebabnya adalah nilai konduktivitas termal bahan padat umumnya lebih tinggi dibandingkan pada saat *liquid phase*. Ketika *solid phase*, ikatan antar molekul sangat kuat sehingga stabilitas panas juga stabil. Selain itu kecenderungan bahan dengan tambahan CNT memiliki kecepatan kenaikan suhu lebih tinggi dibandingkan tanpa CNT ketika masih dalam *phase solid sensibel*.

Fase selanjutnya adalah *liquid- solid transition phase* yang terjadi pada kisaran suhu awal 61,6 °C hingga sampel tersebut menjadi fase cair awal pada kisaran suhu 100 °C. Pada fase ini sampel PCM terjadi ketidakstabilan suhu sedangkan sampel SSPCM secara keseluruhan lebih baik yang terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada tahapan ini baik kelompok PCM maupun SSPCM tetap mengalami kenaikan yang signifikan.



Gambar 3. Nilai *charging* kelompok PCM



Gambar 4. Nilai *charging* kelompok SSPCM

Tahap terakhir adalah *liquid sensibel*, pada tahap ini parafin telah menjadi cair secara seutuhnya, kemudian CNT menyebar lebih merata keseluruh sisi sampel karena adanya perpindahan panas konveksi alami dari parafin yang telah berubah menjadi cairan. Pada fase ini ditandai dengan lebih stabilnya perubahan suhu terhadap waktu dimulai dari kisaran

suhu 100 °C sampai suhu 130 °C yaitu pengisian 100%. Pada *phase sensible liquid* terlihat penambahan CNT sangat mempengaruhi kecepatan waktu proses pengisian. Sampel PCM dengan CNT terbanyak menghasilkan waktu tercepat pada proses pengisian, yaitu 21 menit.

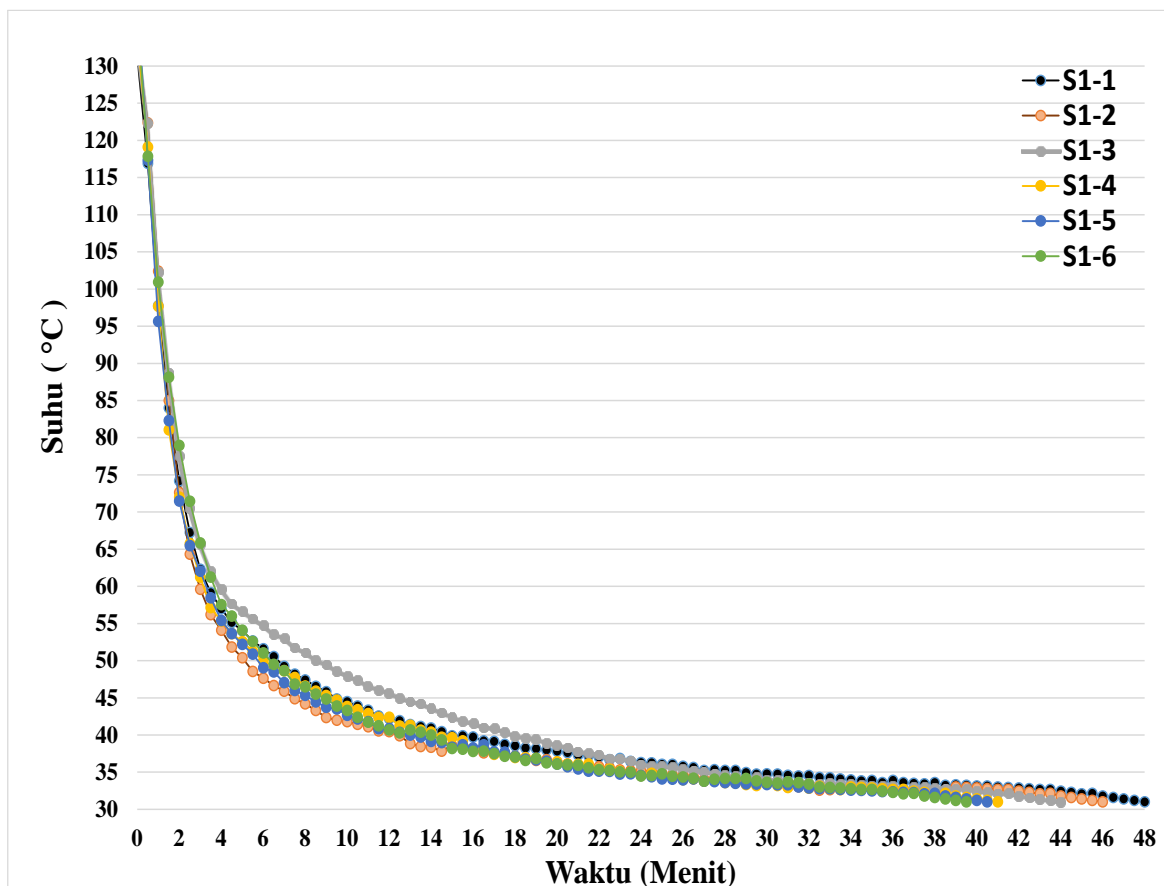
Pada pengujian *discharging*, waktu yang dibutuhkan jauh lebih lama

dibandingkan dengan proses *charging* baik pada PCM maupun SSPCM. Pada Gambar 5 dan Gambar 6 terlihat bahwa parafin membutuhkan waktu paling lama dengan waktu 48 menit, SSPCM memiliki waktu 45,5 menit, PCM CNT 10 wt% membutuhkan waktu 39,5 menit dan SSPCM CNT 10 wt% dengan waktu 38 menit dan menjadi waktu tercepat. Disini didapatkan penambahan CNT memiliki pengaruh terhadap percepatan proses pelepasan panas. Alasannya adalah karena adanya efek alami dari CNT, yaitu konduktivitas termal yang tinggi.

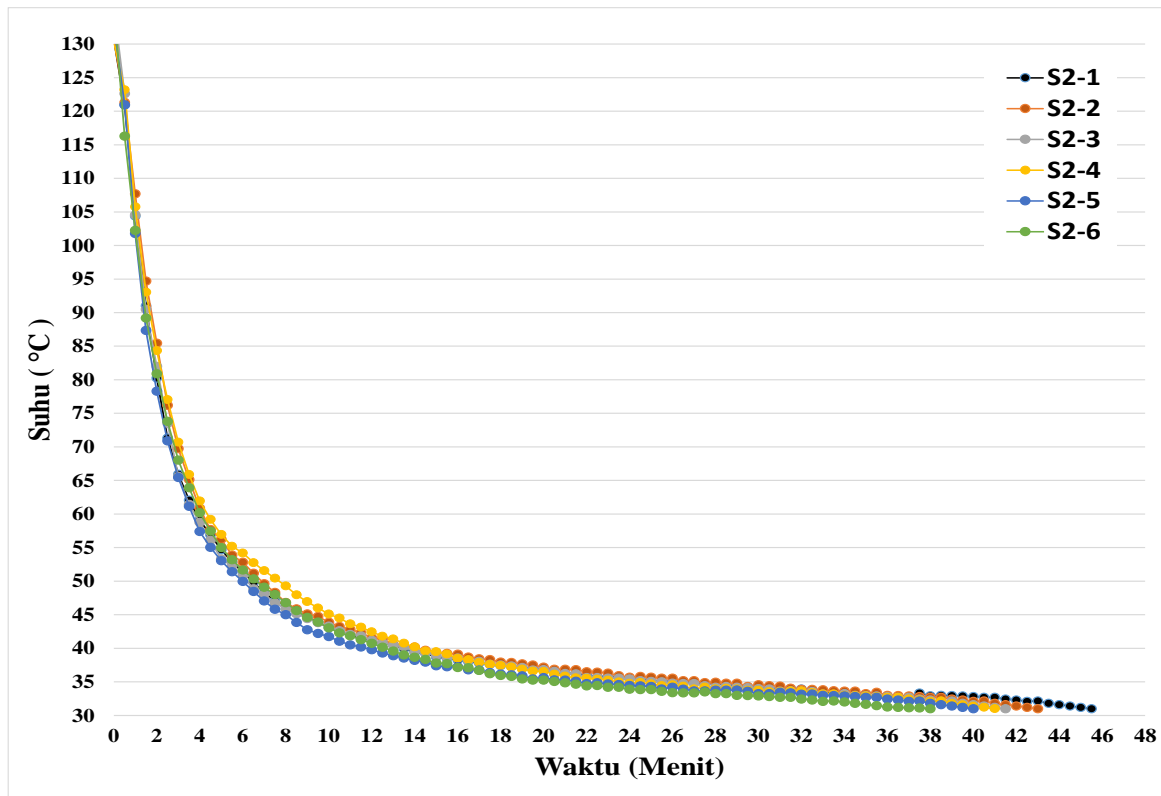
Tahapan proses *discharging* merupakan kebalikan dari proses *charging* diawali dari *liquid sensible* kemudian *solid-liquid transition* dan yang terakhir adalah *solid sensible*. Pada proses *liquid sensible* hasilnya menunjukkan bahwa semua bahan mengalami penurunan suhu yang signifikan baik kelompok PCM maupun SSPCM

seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6. Kecepatan pada proses ini memberikan dampak yang baik karena mampu menghasilkan energi yang besar sehingga lebih mudah dalam aplikasi penggunaan dibandingkan ketika energi yang dihasilkan kecil dalam waktu lama.

Akan tetapi, penurunan suhu yang cepat ini memberikan arti lain juga, yaitu bahan tersebut tidak mampu mempertahankan panas dengan baik sehingga banyak panas yang terbuang kelilingan. Pada proses *discharging solid-liquid transition* secara umum masih terlihat ketidakstabilan suhu namun bahan SSPCM memiliki kecenderungan lebih stabil pada saat fase ini. Pada fase ini komposit PCM maupun SSPCM masih mengalami penurunan suhu namun tidak signifikan ketika fase *liquid sensible* sehingga membutuhkan waktu lebih lama.

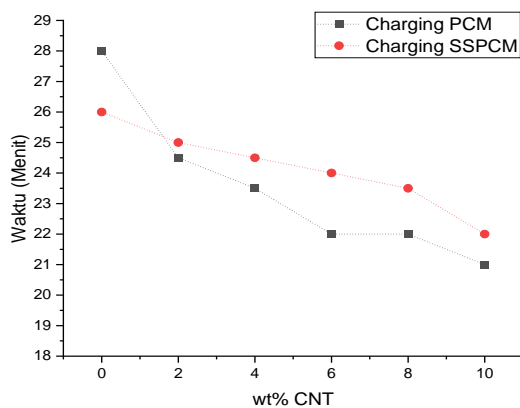


Gambar 5. Nilai *discharging* kelompok PCM



Gambar 6. Nilai *discharging* kelompok SSPCM

Pada fase terakhir adalah *solid sensible*, pada fase ini masih terjadi pelepasan energi panas baik pada kelompok PCM maupun SSPCM, namun nilainya sangat kecil dan dalam kurun waktu yang sangat lama sehingga tidak memungkinkan untuk digunakan dalam pengaplikasian. Efek penambahan CNT terbukti berpengaruh pada percepatan proses *charging* PCM dan SSPCM. Semakin banyak CNT maka semakin cepat waktu untuk mencapai 100% pengisian. Percepatan kenaikan suhu terhadap waktu tidak linier dengan banyaknya CNT.

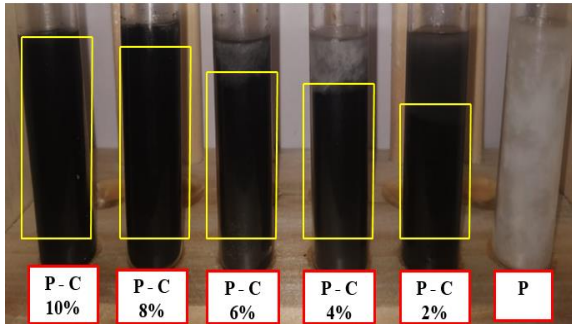


Gambar 7. Percepatan waktu *charging*

Pada Gambar 7 percepatan paling signifikan proses *charging* kelompok PCM adalah ketika dikombinasikan dengan CNT 6 wt% dengan kecepatan 4,45 °C/min dan menghasilkan daya sebesar 3,83 watt. Nilai tersebut mengalami kenaikan sebesar 6,7% dibandingkan dengan penambahan CNT 4% dengan nilai 4,21 °C/min dengan daya sebesar 3,62 watt, sedangkan untuk parafin sendiri kecepataanya adalah 3,51 °C/min dan menghasilkan daya sebesar 3,10 watt yang artinya PCM CNT 6 wt% mengalami peningkatan sebesar 23% dibandingkan parafin. Penambahan melebihi 6 wt% masih memberikan peningkatan, namun tidak seoptimal 6 wt%.

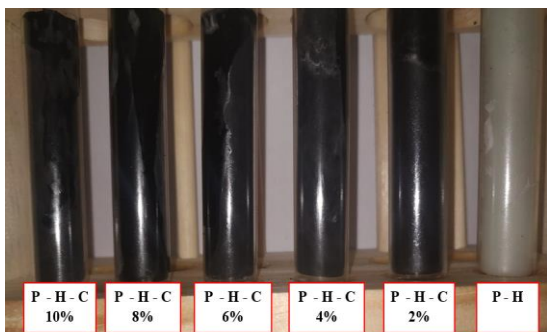
Percepatan pada komposisi tersebut dipengaruhi oleh berbagai macam faktor salah satunya adalah kekentalan. Ketika bahan memiliki kekentalan melebihi batas, maka perpindahan panas akan terhambat yang berdampak pada perlambatan waktu. Selain itu, aglomerasi CNT ketika fase cair disebabkan oleh efek alami bahan nano yang bertumpuk karena gravitasi dan adanya gaya van der Waals menjadi faktor lainnya. Semakin besar jumlah CNT yang

ditambahkan, maka semakin besar juga potensi presipitasi CNT yang berdampak pada penurunan konduktivitas termal bahan sehingga penambahan sebaiknya dilakukan jangan melebihi batas kadar penambahan.



Gambar 8. Penampakan sampel PCM CNT setelah static test

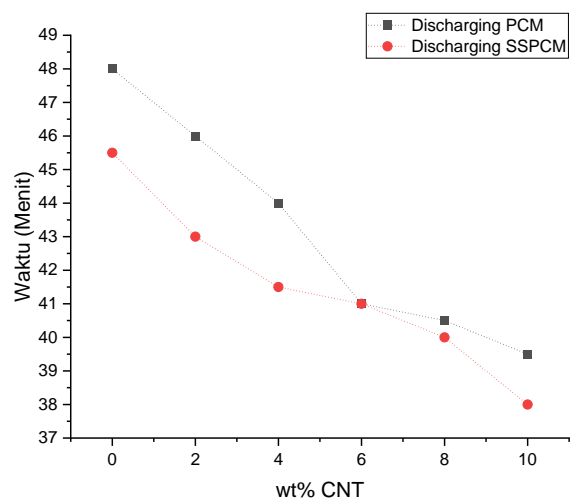
Pada kelompok SSPCM proses *charging* dengan waktu tercepat adalah SSPCM CNT 10 wt% dengan waktu 22 menit dengan kecepatan 4,47 °C/min dan menghasilkan daya sebesar 3,61 watt yang artinya mengalami peningkatan sebesar 16% dibandingkan parafin. Penggunaan HDPE sebagai bahan penyusun SSPCM memberikan dampak fisik secara nyata terhadap peningkatan kekentalan. kekentalan yang melebihi batas memberikan efek kurang baik terhadap waktu pada proses pengisian secara keseluruhan. Pada semua sampel SSPCM persentase CNT yang sama terlihat memiliki kecenderungan waktu pengisian yang lebih lambat dibandingkan kelompok PCM CNT.



Gambar 9. Penampakan sampel SSPCM setelah static test

Dampak positif dari HDPE adalah mampu meningkatkan kestabilan pada fase

transisi sehingga tidak banyak energi yang terbuang selain itu HDPE juga terbukti mampu mengurangi aglomerasi CNT pada saat fase cair serta mampu menahan CNT lebih menyeluruh ketika proses pembekuan seperti Gambar 9. Pengurangan aglomerasi ketika fase cair ini sangat berpengaruh ketika dilakukan pemakaian berulang dalam jangka waktu panjang sebab ketika sampel dalam keadaan fase solid dan dipergunakan kembali, maka penyebaran CNT sudah dalam posisi jauh lebih merata yang berdampak baiknya penyebaran panas pada fase *charging solid sensible*.



Gambar 10. Percepatan waktu *discharging*

Pada Gambar 10 proses *discharging* PCM CNT memiliki waktu lebih baik dibandingkan PCM parafin. Kecepatan PCM parafin 2 °C/min dan menghasilkan daya sebesar 1,8 watt. Efek penambahan setiap kelipatan 2 wt% CNT memberikan waktu percepatan yang berbeda-beda. Pada Gambar 7 terlihat penurunan waktu yang signifikan ketika kandungan CNT sebesar 6 wt% dengan kecepatan penurunan sekitar 2,51 °C/min yang mengalami percepatan sebesar 8,9% dari sampel PCM CNT 4%. Selain itu, nilai tersebut jauh lebih besar dari rata-rata kenaikan sampel 5,5% pada setiap penambahan 2 wt% CNT.

Nilai percepatan proses *discharging* mengalami perubahan kecenderungan ketika dilakukan penambahan CNT menjadi 8 wt% dan 10 wt% sehingga percepatan berkurang menjadi 7,2% dan 0,7%. Hasil ini

menggambarkan bahwa penambahan bahan CNT memiliki batas tertentu pada proses *discharging*. Ketika diberikan masa CNT melebihi batas, maka berdampak adanya penumpukan dan berpengaruh terhadap kekentalan yang menimbulkan perlambatan kecepatan proses *discharging*.

Pada kelompok SSPCM, penambahan CNT berpengaruh baik terhadap proses pengosongan seperti pada gambar 8. Bahan SSPCM dengan kadar CNT yang sama memiliki performa lebih baik daripada kelompok PCM pada proses *discharging*. Selain CNT, bahan penyusun SSPCM sendiri, yaitu HDPE juga memiliki peran penting pada pengujian performa *discharging*, yaitu sifat alami yang dimiliki HDPE adalah kemampuan melewati proses transisi fase yang cepat ditambah dengan adanya CNT sehingga pemerataan proses pendinginan menjadi semakin sempurna. Waktu tercepat proses *discharging* adalah SSPCM dengan tambahan CNT 10 wt % yang menghasilkan kecepatan penurunan suhu sebesar 2,76 °C/min dan menghasilkan daya sebesar 2,1 watt yang artinya mengalami peningkatan sebesar 16% dibandingkan parafin.

4. Kesimpulan

Penambahan CNT terbukti mempengaruhi percepatan waktu *charging* maupun *discharging* kelompok PCM maupun SSPCM sehingga berdampak terhadap performa. Percepatan waktu tidak linier terhadap penambahan kadar CNT. Peningkatan performa paling optimal pada proses *charging* didapatkan pada sampel Parafin CNT 6 wt% dengan peningkatan 23% dan SSPCM CNT 10 wt% dengan nilai 16% pada proses *discharging* sehingga penggunaan CNT 6 wt% direkomendasikan pada bahan PCM dan CNT 10 wt% pada SSPCM. Pada kelompok sampel SSPCM didapatkan bahwa HDPE ketika dikombinasikan dengan CNT memberikan efek perlambatan 5% pada proses *charging* dan percepatan 2% untuk *discharging*.

Referensi

- [1] A. Karaipekli, A. Biçer, A. Sari, and V. V. Tyagi, "Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 134, pp. 373–381, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.053.
- [2] R. A. Rahman, G. Haryanto, and E. A. Pane, "The Optimal Pitch Distance for Maximizing the Power Ratio for Savonius Turbine on Inline Configuration," vol. 11, no. 2, 2021.
- [3] A. Shodiqin and A. Yani, "ANALISA CHARGING TIME SISTEM SOLAR CELL," vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2016.
- [4] Z. Lillahulhaq, "Pengaruh variasi laju aliran fluida terhadap kapasitas pengeringan pakaian (tipe pengering lemari)," vol. 12, no. 1, pp. 128–133, 2023.
- [5] X. Huang *et al.*, "Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications," *Chem. Eng. J.*, vol. 356, no. June 2018, pp. 641–661, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.09.013.
- [6] I. Renewable and E. Agency, *INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY.*
- [7] B. M. Suyitno, Ismail, and R. A. Rahman, "Improving the performance of a small-scale cascade latent heat storage system by using gradual melting temperature storage tank," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 45, no. October 2022, p. 103034, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103034.
- [8] D. Gibb *et al.*, "Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition," no. September, p. 154, 2018.
- [9] A. Sharma, V. V Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," vol. 13,

- pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [10] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy Build.*, vol. 59, pp. 82–103, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- [11] D. S. Mehta, K. Solanki, M. K. Rathod, and J. Banerjee, “Thermal performance of shell and tube latent heat storage unit: Comparative assessment of horizontal and vertical orientation,” *J. Energy Storage*, vol. 23, no. March, pp. 344–362, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.03.007.
- [12] A. Marani and M. Madhkhan, “Thermal performance of concrete sandwich panels incorporating phase change materials: An experimental study,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 12, pp. 760–775, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.022.
- [13] N. Stathopoulos, A. Pina, P. Ferrão, J. Fournier, B. Lacarrière, and O. Le Corre, “A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage phase change materials in thermal energy storage Assessing the feasibility of using the heat Vassilis district,” *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 385–394, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.101.
- [14] S. Raoux, “Phase Change Materials,” 2009, doi: 10.1146/annurev-matsci-082908-145405.
- [15] Ismail, M. S. L. Syahbana, and R. A. Rahman, “Thermal Performance Assessment for an Active Latent Heat Storage Tank by Using Various Finned-Coil Heat Exchangers,” *Int. J. Heat Technol.*, vol. 40, no. 6, pp. 1470–1477, 2022, doi: 10.18280/ijht.400615.
- [16] Y. Harmen, “Thermal performance of PEG-MWCNTs composites as shape-stabilised phase change materials for thermal energy storage,” *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures*, vol. 29, no. 9, pp. 732–738, 2021, doi: 10.1080/1536383X.2021.1887146.
- [17] Z. Khan, Z. Khan, and A. Ghafoor, “A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 132–158, May 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.045.
- [18] D. Rahmalina and R. A. Rahman, “Increasing the rating performance of paraffin up to 5000 cycles for active latent heat storage by adding high-density polyethylene to form shape-stabilized phase change material,” *J. Energy Storage*, vol. 46, no. August 2021, p. 103762, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103762.
- [19] L. Fan and J. M. Khodadadi, “Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review §,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 24–46, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.08.007.
- [20] S. Abishek, “Effect of microstructure on melting in metal-foam/paraffin composite phase change materials,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 127, pp. 135–144, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.054.
- [21] B. M. Suyitno, D. Rahmalina, and R. A. Rahman, “Increasing the charge/discharge rate for phase-change materials by forming hybrid composite paraffin/ash for an effective thermal energy storage system,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 70–85, 2023, doi: 10.3934/matersci.2023005.
- [22] L. Liu, D. Su, Y. Tang, and G. Fang, “Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp.

- 305–317, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.057.
- [23] P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, and P. L. McEuen, “Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, no. 21, pp. 215502-1-215502-4, 2001, doi: 10.1103/PhysRevLett.87.215502.
- [24] Z. T. Yu *et al.*, “Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes,” *Carbon N. Y.*, vol. 53, pp. 277–285, 2013, doi: 10.1016/j.carbon.2012.10.059.
- [25] W. Cheng, R. Zhang, K. Xie, N. Liu, and J. Wang, “Heat conduction enhanced shape-stabilized paraffin/HDPE composite PCMs by graphite addition: Preparation and thermal properties Wen-long,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 10, pp. 1636–1642, 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.05.020.
- [26] J. A. Molefi, A. S. Luyt, and I. Krupa, “Comparison of LDPE, LLDPE and HDPE as matrices for phase change materials based on a soft Fischer-Tropsch paraffin wax,” *Thermochim. Acta*, vol. 500, no. 1–2, pp. 88–92, 2010, doi: 10.1016/j.tca.2010.01.002.
- [27] M. Mu, P. A. M. Basheer, W. Sha, Y. Bai, and T. McNally, “Shape stabilised phase change materials based on a high melt viscosity HDPE and paraffin waxes,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 68–82, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.030.