

APLIKASI MATERIAL PERUBAHAN FASA UNTUK ALAT PENUKAR KALOR TERHADAP PENYIMPANAN ENERGI TERMAL

Erwin^{1*}, Yefri Chan¹, Herry Susanto¹, Husen Asbanu¹, Yovi Lenardo²

¹Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada

²Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada

Jl. Taman Malaka Selatan No.22, Pondok Kelapa, Duren Sawit, DKI Jakarta, Indonesia 13450

*Koresponden : erwin@ft.unsada.ac.id

Abstrak

Phase Change Material (PCM) semakin populer digunakan sebagai sistem Thermal Energy Storage (TES) karena memiliki kapasitas penyimpanan energi laten yang besar dan perilaku isothermal yang baik. PCM dapat menyerap dan melepaskan energi panas laten dalam jumlah besar dan dapat diisi ulang tanpa memerlukan konsumsi energi tambahan. PCM menjadi alternatif yang menarik untuk aplikasi penyimpanan energi karena kemampuannya menjaga suhu yang stabil saat menyerap atau melepaskan energi panas laten. Kajian literatur dilakukan untuk mengumpulkan informasi tentang penggunaan material tertentu untuk meningkatkan kinerja penyimpanan energi termal, seperti material karbon dan busa tembaga. Dalam kajian literatur ini, disimpulkan bahwa komposit PCM dengan matriks grafit berpori dan jaringan serat karbon dapat meningkatkan konduktivitas termal dan menjaga stabilitas suhu dalam waktu yang cukup lama. Penggunaan CNT ultra-panjang dapat meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi termal. Penambahan busa tembaga pada PCM dapat meningkatkan kinerja penyimpanan energi termal dengan cara meningkatkan konduktivitas termal dan mempercepat laju perpindahan panas, sehingga meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal. Komposit PCM dengan tambahan busa tembaga mampu menyerap panas secara efisien dengan entalpi yang tinggi dan memiliki stabilitas termal yang memadai pada rentang suhu yang relevan operasi, sehingga memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi penyimpanan energi termal yang berkelanjutan.

Kata kunci: Material, Konduktivitas termal, PCM, TES

Abstract

Phase Change Material (PCM) is increasingly being used as a Thermal Energy Storage (TES) system due to it has a large latent energy storage capacity and good isothermal behavior. PCM has the ability to absorb and release significant numbers of latent heat energy. and can be recharged without requiring additional energy consumption. PCM is becoming an attractive alternative for energy storage applications because of its ability to maintain a stable temperature while absorbing or releasing latent heat energy. A literature review was conducted to collect information on utilizing specific materials to increase the performance of thermal energy storage, such as carbon and copper foam materials. Based on this comprehensive review of the literature, it can be concluded that PCM composites with a porous graphite matrix and carbon fiber network can increase thermal conductivity and maintain temperature stability for a long time. The use of ultra-long CNTs can increase the efficiency of systems utilizing thermal energy storage. The addition of copper foam to PCM has the potential to enhance the efficiency of thermal energy storage. by increasing thermal conductivity and expediting heat transfer rates, consequently enhancing the efficiency of thermal energy storage. PCM composites with added copper foam are able to dissipate heat efficiently at high enthalpies and have adequate thermal stability over a relevant operating temperature range, thus having the potential to be used in continuous applications involving thermal energy storage.

Keywords: Materials, Thermal Conductivity, PCM, TES

1. Pendahuluan

Belakangan ini, penggunaan material perubahan fasa atau *Phase Change Material* (PCM) untuk sistem *Thermal Energy Storage* (TES) semakin populer karena memiliki kapasitas penyimpanan energi laten yang besar dan perilaku isothermal yang baik [1]. PCM dapat menyerap dan melepaskan energi panas laten dalam jumlah yang besar, dan dapat diisi ulang tanpa memerlukan konsumsi energi tambahan [2]. Dalam aplikasi penyimpanan energi, PCM menjadi alternatif yang sangat menarik karena kemampuannya untuk menjaga suhu yang stabil saat menyerap atau melepaskan energi panas laten [3]. Namun, konduktivitas termal PCM yang rendah menjadi salah

satu kendala utama dalam penggunaannya. Hal ini disebabkan oleh tingkat pengisian dan pengosongan yang rendah pada siklus termal, sehingga meningkatkan konduktivitas termal PCM menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal. Oleh karena itu, penelitian terus dilakukan untuk menemukan solusi untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM dan memperbaiki kerjanya sebagai media penyimpanan energi termal yang efisien dan berkelanjutan [4].

Material perubahan fasa (*Phase Change Material/PCM*) adalah bahan yang dapat melakukan perubahan fase dari satu fase ke fase lainnya, seperti dari padat ke cair, cair ke padat, atau padat ke padat. Proses perubahan fase ini memerlukan atau menghasilkan energi panas laten, sehingga PCM dapat berfungsi sebagai penyimpan panas [5]. PCM dapat digunakan sebagai medium perpindahan panas untuk menangkap dan melepaskan panas pada suhu fase perubahan (transition phase), yang biasanya terjadi pada suhu konstan [6]. Penyimpanan energi termal (*thermal energy storage/TES*) menjadi solusi penting dalam meningkatkan efisiensi energi pada berbagai sistem, dan material penyimpanan panas seperti fase perubahan material (*Phase Change Material/PCM*) menjadi pilihan yang umum digunakan. Namun, konduktivitas termal yang rendah dari PCM dapat menghambat proses perpindahan panas, sehingga mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem TES secara keseluruhan.

Oleh karena itu, penelitian tentang pengaruh material pada peningkatan perpindahan panas dalam TES perlu dikaji dengan lebih lanjut. Dengan memahami pengaruh material pada perpindahan panas dalam TES, maka bisa dilakukan upaya untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem TES. Selain itu, dengan meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem TES, maka bisa membantu dalam mempromosikan penggunaan energi yang lebih berkelanjutan, karena penggunaan TES dapat membantu dalam memanfaatkan sumber energi yang terbarukan, seperti energi surya atau angin, dan mengoptimalkan penggunaannya dalam sistem energi. Sebagai hasilnya, penelitian mengenai dampak material dalam penyimpanan energi termal (TES) berpotensi memberikan kontribusi penting dalam upaya pengembangan teknologi energi yang lebih berkelanjutan.

2. Metodologi

Metode penelitian ini didasarkan pada survei literasi yang dilakukan pada beberapa sumber literatur. Sumber literatur yang digunakan terdiri dari artikel dan penelitian ilmiah. Pengambilan data dilakukan berdasarkan topik-topik yang diangkat dalam literatur yang digunakan. Survei literasi dilakukan dengan cara membaca dan mengevaluasi secara sistematis literatur yang relevan dengan topik penelitian. Setiap literatur yang digunakan dianalisis dan disusun berdasarkan topik yang diangkat. Kemudian, data yang diperoleh dari literatur tersebut dianalisis dan disimpulkan untuk mendukung permasalahan yang diangkat dalam tinjauan artikel ini. Metode survei literasi ini diharapkan dapat memberikan landasan teoritis yang kuat dan terkini bagi penelitian ini. Dengan menggunakan metode ini, diharapkan bahwa hasil penelitian yang diperoleh memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi dan dapat mendukung tujuan penelitian secara lebih lengkap.

Beberapa jurnal internasional terakreditasi baik yang telah kami survei dan dianggap sebagai sumber literatur yang kredibel dalam artikel ini antara lain: Pengaruh Variasi Jarak dan Material Sirip pada Laju Perpindahan Panas Kondensor AC Split: Analisis Simulasi; Penggunaan Material Fasa Perubahan (*Phase Change Material/PCM*) untuk Penyimpanan Kalor dalam Lemari Pendingin; Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki; Peningkatan Konduktivitas Termal Bahan Perubahan Fasa Menggunakan Matriks Grafit; Peningkatan Konduktivitas Termal Dari Bahan Pengubah Fasa Dengan Jaringan Serat Karbon Berikat Karbon Stabil Bentuk; Komposit Nanotube-Parafin Karbon Ultra-Panjang Konduktivitas Termal Dan Entalpi Perubahan Fase Tinggi Di Antara Bahan Penyimpanan Panas Berbasis Parafin; Optimisasi Konduktivitas Termal Parafin Melalui Penyelarasan Molekul Yang Telah Ditingkatkan Dengan Penambahan CNT; Peningkatan Konduktivitas Termal Bahan Perubahan Fasa Menggunakan Logam Busa, Peningkatan Konduktivitas Termal Bahan Perubahan Fasa Menggunakan Logam Busa; Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Perubahan Fasa Dengan Busa Tembaga; Optimisasi Perpindahan Panas untuk Penyimpanan Energi Termal dengan Menggunakan Busa Logam dalam Material Perubahan Fasa (PCM).

Jurnal-jurnal tersebut dipilih karena mereka terkait langsung dengan topik penelitian dan memiliki metodologi penelitian yang relevan. Selain itu, melalui proses review (kajian) yang ketat untuk memastikan kualitas dan validitas penelitian yang dilakukan.

3. Landasan Teori

3.1. Analisis Pengaruh Material Terhadap Peningkatan Perpindahan Panas

Konduktivitas termal merupakan sifat fundamental dari sebuah material yang sangat penting dalam perpindahan panas. Karakteristik ini memiliki pengaruh terhadap kemampuan material dalam mengalirkan energi panas dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Material dengan konduktivitas termal yang tinggi, seperti logam, memiliki kemampuan untuk menghantarkan panas secara cepat dan efektif, sedangkan material dengan konduktivitas termal yang rendah, seperti bahan isolasi, memiliki kemampuan untuk mengurangi laju perpindahan panas.

Selain itu, penggunaan material yang tepat juga dapat mengurangi kerugian energi pada sistem perpindahan panas. Material dengan konduktivitas termal yang tinggi pada sistem isolasi, misalnya, dapat mengurangi kebocoran panas pada sistem isolasi dan mengurangi kerugian energi pada sistem perpindahan panas. Dalam penggunaannya pada sistem perpindahan panas, pemilihan material harus mempertimbangkan berbagai faktor seperti konduktivitas termal, densitas, kekuatan, biaya, dan kemampuan untuk tahan korosi dan suhu tinggi. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem perpindahan panas secara keseluruhan [7].

3.2. Analisis Pemanfaatan PCM Sebagai Bahan Penyimpan Kalor

Phase Change Material (PCM) adalah suatu material atau bahan yang mempunyai kemampuan untuk menyerap atau melepaskan kalor dalam jumlah besar pada saat terjadi perubahan fase. PCM memiliki kemampuan untuk mengubah fase dari padat menjadi cair atau sebaliknya pada kisaran suhu tertentu, tergantung pada sifat-sifat materialnya [8]. Pemanfaatan PCM sebagai bahan penyimpanan kalor juga berpotensi untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin atau pendingin udara. Dalam sistem pendingin udara, PCM dapat digunakan untuk mengurangi beban sistem pendingin udara dan meningkatkan kenyamanan pengguna. PCM dapat diintegrasikan pada panel dinding atau langit-langit ruangan, atau pada material bahan bangunan lainnya. Secara keseluruhan, pemanfaatan PCM sebagai bahan penyimpanan kalor menawarkan banyak keuntungan dalam mengoptimalkan penggunaan energi dan meningkatkan efisiensi sistem. Dalam perkembangan teknologi, terus dilakukan penelitian untuk mengembangkan jenis PCM yang lebih efektif dan ramah lingkungan, serta mengoptimalkan desain sistem penyimpanan energi termal yang lebih efisien dan terjangkau.

3.3. Analisis Pengaruh PCM terhadap Penyimpanan Energi Termal

Penyimpanan energi termal (*thermal energy storage/TES*) adalah proses penyimpanan energi dalam bentuk panas atau dingin untuk digunakan pada waktu yang akan datang. Konsep dasar dari TES adalah mengumpulkan energi panas atau dingin saat tersedia dalam jumlah berlebih, dan menyimpannya untuk digunakan ketika dibutuhkan. Penyimpanan energi termal yang menggunakan PCM telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi pada sistem pemanas atau pendingin ruangan, sistem pemanas air, dan sistem tenaga surya. PCM merupakan bahan penyimpanan termal yang dapat menyerap dan melepaskan energi panas saat terjadi perubahan fase dari padat menjadi cair atau sebaliknya, sehingga efektif digunakan sebagai media penyimpanan energi termal [9].

Dalam penyimpanan energi termal menggunakan PCM, energi panas yang dihasilkan oleh mesin atau perangkat pada periode tinggi permintaan atau musim panas disimpan pada PCM dan kemudian dilepaskan kembali saat dibutuhkan pada periode waktu dengan permintaan energi yang lebih tinggi atau musim dingin. Penggunaan PCM membantu memaksimalkan penggunaan energi yang ada dan meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi termal. Keuntungan menggunakan PCM dalam penyimpanan energi termal adalah karena PCM memiliki kapasitas termal yang tinggi dan dapat mengurangi fluktuasi suhu dan beban sistem pemanas atau pendingin ruangan. Selain itu, terdapat banyak penelitian yang dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan PCM dalam penyimpanan energi termal, sehingga penyimpanan energi termal berkaitan dengan PCM menjadi salah satu opsi yang menarik dalam mengoptimalkan penggunaan energi pada sistem pemanas atau pendingin ruangan, sistem pemanas air, dan sistem tenaga surya di masa depan.

Meskipun TES dengan fase perubahan menawarkan banyak potensi dan manfaat, terdapat tantangan yang perlu diatasi untuk mengoptimalkan penggunaannya. Salah satu tantangan utama adalah keberlanjutan dan kestabilan material PCM. Beberapa PCM dapat mengalami degradasi atau perubahan sifat termal seiring penggunaan jangka panjang, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan PCM yang lebih tahan lama dan stabil. Selain itu, aspek efisiensi juga menjadi perhatian penting dalam pengembangan sistem TES [10].

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Pengaruh Material Karbon Terhadap Peningkatan Perpindahan Panas Dalam Penyimpanan Energi Termal

Peningkatan konduktivitas termal material perubahan fasa menggunakan matriks grafit, diketahui bahwa komposit PCM dengan matriks grafit berpori memiliki fraksi massa PCM yang tinggi dan konduktivitas termal yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa komposit tersebut dapat dijadikan sebagai bahan penyimpanan termal yang memiliki daya dan kestabilan yang tinggi. Selain itu, komposit tersebut juga memiliki waktu pelelehan yang singkat dan panas laten yang tinggi, yang menjadikannya cocok untuk aplikasi penyimpanan energi termal pada sistem konversi energi surya dan sistem pendingin [11]. Pengujian yang dilakukan pada komposit PCM dengan matriks grafit berpori menunjukkan bahwa bahan tersebut mampu menjaga stabilitas suhu dalam waktu yang lama. Oleh karena itu, komposit ini sangat cocok untuk diaplikasikan pada sistem pemanfaatan energi surya yang

memerlukan penyimpanan energi dalam periode waktu yang signifikan. Selain memiliki kinerja yang baik, komposit PCM dengan matriks grafit berpori juga dapat dihasilkan dengan mudah dan biaya yang relatif rendah. Dengan hasil penelitian ini, diperoleh wawasan tentang potensi penggunaan komposit grafit berpori yang diresapi dengan PCM sebagai bahan penyimpanan termal dengan daya dan kestabilan yang tinggi untuk aplikasi pada sistem konversi energi surya dan sistem pendingin. Bahan ini memiliki fraksi massa PCM dengan tingkat yang tinggi dan kemampuan konduktivitas termal yang baik, sehingga mampu menjaga stabilitas suhu selama periode yang signifikan. Selain itu, waktu pelelehan yang singkat dan panas laten yang tinggi juga membuatnya cocok untuk aplikasi penyimpanan energi termal pada sistem konversi energi surya dan sistem pendingin.

Analisis terhadap peningkatan konduktivitas termal dari bahan pengubah fasa dengan jaringan serat karbon, digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi. Namun, konduktivitas termal PCM yang rendah sering menjadi kendala dalam aplikasi penyimpanan energi. Untuk mengatasi tantangan ini, sesuatu pendekatan yang dapat diambil ialah dengan menambahkan jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon ke dalam PCM [12]. Penambahan jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon dapat meningkatkan konduktivitas termal PCM secara signifikan, karena karbon yang terikat dengan serat karbon memiliki konduktivitas termal yang sangat baik. Selain itu, jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon membentuk struktur yang stabil secara bentuk sehingga PCM yang ditanamkan tidak mudah bocor. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon dapat meningkatkan konduktivitas termal PCM hingga 3 kali lipat dibandingkan dengan PCM tanpa penambahan jaringan serat karbon. Dengan demikian, penambahan jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon dapat meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi secara signifikan. Dalam aplikasi praktis, penambahan jaringan serat karbon ke dalam PCM dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin udara, sistem penyimpanan energi baterai, dan lain-lain. Penambahan jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon ke dalam PCM dapat menjadi solusi untuk meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan. Jaringan serat karbon yang terikat dengan karbon memiliki konduktivitas termal yang sangat baik dan membentuk struktur yang stabil sehingga PCM yang ditanamkan tidak mudah bocor.

Analisis komposit nanotube-parafin karbon ultra-panjang dengan konduktivitas Termal dan entalpi perubahan fase tinggi di antara bahan penyimpan panas berbasis parafin. Penelitian ini difokuskan pada penggunaan karbon nanotube (CNT) sebagai pengisi dalam bahan penyimpanan panas berbasis parafin. Dalam penelitian ini, disajikan hasil yang menunjukkan bahwa penggunaan CNT ultra- panjang dapat meningkatkan konduktivitas termal dan entalpi perubahan fase dalam bahan penyimpanan panas parafin [13]. Pengujian menunjukkan bahwa penambahan CNT ke dalam bahan penyimpanan panas parafin dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan, bahkan hingga mencapai 22,3 W/mK untuk komposit yang mengandung 30% CNT ultra-panjang. Hal ini sangat signifikan karena konduktivitas termal yang lebih tinggi memungkinkan bahan penyimpanan panas untuk menyimpan dan melepaskan panas dengan lebih cepat dan efisien. Selain itu, bahan penyimpanan panas CNT- parafin juga menunjukkan entalpi perubahan fase yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan penyimpanan panas parafin murni, dengan nilai tertinggi mencapai 231,4 J/g. Ini menunjukkan bahwa CNT ultra-panjang dapat meningkatkan kemampuan bahan penyimpanan panas untuk menyerap dan melepaskan energi panas. Penambahan CNT ultra-panjang juga dapat meningkatkan efisiensi bahan penyimpanan panas berbasis parafin dan dapat diaplikasikan dalam bidang penyimpanan energi termal, seperti sistem pemanas dan pendingin bangunan, penyimpanan energi surya, dan sistem pendingin untuk kendaraan listrik. Faktor-faktor yang mempengaruhi konduktivitas termal dan entalpi perubahan fase dalam bahan penyimpanan panas CNT- parafin, seperti konsentrasi CNT, ukuran, dan morfologi CNT juga dianalisis dan disajikan dalam penelitian ini. Hal ini sangat penting dalam penyimpanan energi termal, karena konduktivitas termal yang lebih tinggi memungkinkan bahan penyimpanan panas untuk menyimpan dan melepaskan panas dengan lebih cepat dan efisien, sementara entalpi perubahan fase yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan bahan penyimpanan panas untuk menyerap dan melepaskan energi panas.

Analisis optimisasi konduktivitas termal parafin melalui penyelarasan molekul yang telah ditingkatkan dengan penambahan CNT. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan meningkatkan konduktivitas termal parafin melalui pemanfaatan Karbon Nanotube (CNT) dan graphene sebagai material pengisi. Metode penelitian yang digunakan melibatkan penambahan CNT dan graphene ke dalam parafin dengan variasi konsentrasi yang berbeda. Pengukuran konduktivitas termal komposit parafin-CNT-graphene dilakukan menggunakan metode termorefleksi [14]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan CNT dan graphene secara signifikan meningkatkan konduktivitas termal parafin. Peningkatan ini dapat dijelaskan oleh dua faktor utama. Pertama, adanya interaksi antara CNT atau graphene dengan molekul parafin meningkatkan penyelarasan molekul dalam parafin, yang pada akhirnya meningkatkan konduktivitas termal. Kedua, CNT dan graphene memiliki konduktivitas termal intrinsik yang tinggi, yang juga berkontribusi pada peningkatan konduktivitas termal komposit. Selain itu, penelitian ini juga menemukan bahwa konsentrasi dan orientasi CNT dan graphene memiliki pengaruh terhadap tingkat peningkatan konduktivitas termal. Terdapat konsentrasi dan orientasi tertentu yang optimal untuk mencapai

peningkatan konduktivitas termal maksimal. Oleh karena itu, pemilihan konsentrasi dan pengaturan orientasi material pengisi menjadi faktor penting dalam pengembangan komposit parafin dengan konduktivitas termal yang tinggi. Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan material termal dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi. Peningkatan konduktivitas termal parafin melalui penambahan CNT dan graphene dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk sistem penyimpanan energi termal, sistem pendingin, dan transfer panas yang efisien. Material ini memiliki potensi dalam industri energi dan teknologi termal untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem yang membutuhkan transfer panas yang cepat dan efektif. Perbandingan peningkatan konduktivitas termal menggunakan berbagai jenis karbon dapat ditarik kesimpulan berikut: Komposit PCM dengan matriks grafit berpori memiliki fraksi massa PCM yang tinggi dan konduktivitas termal yang baik, cocok untuk aplikasi pada sistem konversi energi surya dan sistem pendingin dengan biaya produksi yang relatif rendah; Penambahan jaringan serat karbon pada PCM dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan dan efisiensi sistem penyimpanan energi secara umum; penambahan CNT ultra-panjang pada bahan penyimpanan panas parafin dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan dan menunjukkan entalpi perubahan fase yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan penyimpanan panas parafin murni; penambahan CNT dan graphene secara signifikan meningkatkan konduktivitas termal parafin dengan adanya peningkatan penyelarasan molekul dalam parafin serta konduktivitas termal intrinsik yang tinggi pada CNT dan graphene.

4.2 Pengaruh Busa Logam Terhadap Peningkatan Perpindahan Panas Dalam Penyimpanan Energi Termal

Analisis peningkatan konduktivitas termal material perubahan fasa menggunakan logam busa, penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap eksperimen yang meliputi uji komposisi bahan, uji konduktivitas termal, uji kestabilan termal, dan uji kinerja penyimpanan energi termal [15]. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa komposit PCM dengan konsentrasi massa 40% garam hidrat mampu menyerap panas secara efisien dengan entalpi yang tinggi. Penambahan busa tembaga meningkatkan konduktivitas termal bahan penyimpanan, sehingga mempercepat laju perpindahan panas. Selain itu, hasil pengukuran kestabilan termal menunjukkan bahwa komposit PCM ini cukup stabil pada suhu operasi dan tidak mengalami degradasi selama penggunaan. Penelitian ini juga membahas pengaruh parameter geometri busa tembaga terhadap kinerja penyimpanan energi termal. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa busa tembaga dengan densitas yang berbeda-beda dapat memberikan kinerja penyimpanan energi termal yang berbeda pula. Oleh karena itu, penggunaan busa tembaga dengan densitas yang berbeda-beda pada komposit PCM ini dapat membantu dalam mengoptimalkan kinerja penyimpanan energi termal. Dalam keseluruhan penelitian ini, ditemukan bahwa penggunaan komposit PCM dengan tambahan busa tembaga dapat meningkatkan kinerja penyimpanan energi termal dengan stabil dan efisien. Komposit ini mampu menyerap panas secara efisien dengan entalpi yang tinggi dan menunjukkan stabilitas termal yang memadai pada rentang suhu operasional. Penambahan busa tembaga pada komposit ini dapat meningkatkan konduktivitas termal dan mempercepat laju perpindahan panas, sehingga kinerja penyimpanan energi termal menjadi lebih optimal.

Analisis studi eksperimental penyimpanan energi termal perubahan fasa dengan busa tembaga Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi kinerja penyimpanan energi termal menggunakan busa tembaga sebagai media penukar panas pada material fase perubahan (PCM) [16]. Eksperimen dilakukan untuk menganalisis efek kecepatan aliran udara, konsentrasi massa PCM, dan ketebalan busa tembaga terhadap efisiensi penyimpanan energi termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan busa tembaga pada PCM meningkatkan konduktivitas termal dan mempercepat proses perpindahan panas, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal. Konsentrasi massa PCM juga mempengaruhi efisiensi penyimpanan energi termal, dengan konsentrasi massa PCM yang lebih tinggi memberikan entalpi perubahan fase yang lebih besar dan efisiensi penyimpanan energi termal yang lebih baik. Penelitian juga menguji efek kecepatan aliran udara pada sistem penyimpanan energi termal dan menemukan bahwa kecepatan aliran udara yang lebih tinggi dapat meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal dengan mengurangi waktu siklus penyimpanan energi dan meningkatkan laju perpindahan panas. Selain itu, ketebalan busa tembaga juga berpengaruh terhadap efisiensi penyimpanan energi termal, dengan ketebalan busa tembaga yang lebih tipis memberikan efisiensi penyimpanan energi termal yang lebih baik. Penelitian ini mengungkapkan bahwa pemanfaatan busa tembaga sebagai media penukar panas pada PCM memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi penyimpanan energi termal yang berkelanjutan dan dapat meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal.

Analisis optimisasi perpindahan panas untuk penyimpanan energi termal dengan menggunakan busa logam dalam material perubahan fasa (PCM), penelitian ini dilakukan untuk menyoroti peran penting material dalam sistem penyimpanan energi termal (TES). Dalam TES, pemilihan material yang tepat menjadi faktor krusial karena material harus memiliki sifat termal yang baik, termasuk konduktivitas termal yang tinggi dan stabilitas fase yang baik. Konduktivitas termal yang tinggi pada material memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi transfer panas dalam TES [12]. Penelitian ini juga berfokus pada penggunaan *Phase Change Materials* (PCM) sebagai medium penyimpanan energi termal. Karakteristik PCM, seperti entalpi perubahan fase, suhu

leleh, dan kestabilan termal, dipelajari untuk memahami performa TES yang lebih baik. Upaya dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM dengan menggunakan teknik pengisi termal atau modifikasi struktur PCM. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi transfer panas dalam TES. Selain itu, penelitian ini mencoba merancang sistem TES berdasarkan karakteristik material yang dipilih. Desain ini mempertimbangkan konduktivitas termal material, pemilihan PCM yang sesuai, dan integrasi dengan sistem energi termal yang lebih besar. Dalam konteks ini, penelitian juga mengeksplorasi aplikasi praktis material dalam TES, seperti penyimpanan energi surya termal, pengaturan suhu bangunan, dan transportasi panas. Penggunaan material yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem TES ini.

5. Kesimpulan

Material karbon memiliki potensi besar untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM dan menjaga stabilitas suhu dalam jangka waktu yang cukup lama. Komposit PCM dengan matriks grafit berpori memiliki fraksi massa PCM yang tinggi dan konduktivitas termal yang baik, serta waktu pelelehan yang singkat dan panas laten yang tinggi yang cocok untuk aplikasi penyimpanan energi termal pada sistem konversi energi surya dan sistem pendingin. Penambahan jaringan serat karbon ke dalam PCM juga dapat meningkatkan efisiensi sistem pendingin udara, sistem penyimpanan energi baterai, dan lain-lain. Sedangkan penggunaan CNT ultra-panjang dapat meningkatkan konduktivitas termal dan entalpi perubahan fase dalam bahan penyimpanan panas parafin. Hal ini menunjukkan material karbon dapat diaplikasikan dalam sistem penyimpanan energi termal untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas suhu dalam jangka waktu yang cukup lama.

Penggunaan busa tembaga pada material fase perubahan (PCM) juga dapat meningkatkan kinerja penyimpanan energi termal dengan cara meningkatkan konduktivitas termal dan mempercepat laju perpindahan panas, sehingga meningkatkan efisiensi penyimpanan energi termal. Dalam aplikasi praktis, komposit PCM dengan tambahan busa tembaga mampu menyerap panas secara efisien dengan entalpi yang tinggi dan memiliki kemampuan untuk menjaga stabilitas termal yang baik pada rentang suhu operasional, sehingga memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi penyimpanan energi termal yang berkelanjutan.

Ucapan Terima kasih

Terima kasih Kami sampaikan kepada Pimpinan Fakultas Teknik Unsada dan seluruh Dosen Prodi Teknik Mesin yang telah membantu penyelesaian artikel ini. Akhir kata, kami berharap hasil penelitian kami dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang signifikan pada bidang studi yang relevan. Kami mengucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

Daftar Pustaka

- [1] Putra, N. (2015). "Uji Eksperimental Kinerja PCM Beeswax Sebagai Thermal Storage". *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV*, 1.
- [2] Astika, I. M. (2019). "Phase Change Materials for Building Applications: A Review". *Prosiding SNTTM XVIII*, 2.
- [3] Gracia, A. d. (2015). "Phase Change Materials And Thermal Energy Storage For Buildings". *Energy and Buildings*, 1.
- [4] Liwu Fan, J. K. (2011). "Thermal Conductivity Enhancement Of Phase Change Materials For Thermal Energy Storage: A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24-46.
- [5] Sachin Ranaa, b. (2022). "Sensitivity Analysis And Optimization Of The Structural Parameters Of The Exchanger". *Journal of Energy Storage*, 1-2.
- [6] Bauer, T. (2012). *Thermal Energy Storage Materials And Systems*. *Annual Review of Heat Transfer*, 133.
- [7] Edi Elisa, I. G. (2022). "Analisis Simulasi Pengaruh Variasi Jarak dan Material Sirip Kondensor AC Split Terhadap Laju Perpindahan Panas". *Jurnal Rekayasa Mesin. Jurnal Rekayasa Mesin*, 302-303.
- [8] Fauzan, I. (2019). "Penggunaan PCM Sebagai Material Penyimpan Kalor Pada Lemar Pendingin". *Vol 13 No 1 (2019):Simetris*, 1-2.
- [9] Muhammad Nadjib, S. N. (2015). "Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki". *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*, 1-6.
- [10] Belén Zalba, J. M. (2003). "Review On Thermal Energy Storage With Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis And Applications". *Applied Thermal Engineering*, 251-283.
- [11] Andrew Mills, M. F.-H. (2006). "Thermal Conductivity Enhancement Of Phase Change Materials Using A Graphite Matrix". *Applied Thermal Engineering*, 1652-1661.
- [12] C.Y. Zhao, W. L. (2010). "Heat Transfer Enhancement For Thermal Energy Storage Using Metal Foams Embedded Within Phase Change Materials (PCMs)". *Solar Energy*, 1402-1412.

- [13] Anna W. Kuziel, G. D. (2021). "Ultra-Long Carbon Nanotube-Paraffin Composites Of Record Thermal Conductivity And High Phase Change Enthalpy Among Paraffin-Based Heat Storage Materials". *Journal of Energy Storage*, 102396.
- [14] Hasan Babaei, P. K. (2013). "Thermal Conductivity Enhancement Of Paraffins By Increasing The Alignment Of Molecules Through Adding CNT/Graphene". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 209-216.
- [15] T.X. Li, D. W. (2017). "Experimental Investigation On Copper Foam/Hydrated Salt Composite Phase Change Material For Thermal Energy Storage". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148-157.
- [16] Matthieu Martinelli, F. B.-S.-F. (2016). "Experimental Study Of A Phase Change Thermal Energy Storage With Copper Foam". *Applied Thermal Engineering*, 247-261.
- [17] Zhao Jiang, T. O. (2018). "Thermal Conductivity Enhancement Of Phase Change Materials With Form-Stable Carbon Bonded Carbon Fiber Network". *Materials & Design*, 177-184.

