

Tinjauan Bio-Phase Change Material Asam Laurat dan Asam Stearat sebagai Media Penyimpan Panas Laten pada Sistem Manajemen Termal Baterai (Battery Thermal Management System)

Sabiqunasabiqun1, Alfian Ady Saputra2

1 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung, Indonesia
2 Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

Jl. Raya Jakarta – Serang, Serang, Indonesia

sabiqun11@eng.unila.ac.id

Abstrak— Pertumbuhan pesat kendaraan listrik menempatkan baterai lithium-ion (Li-ion) sebagai komponen penyimpan energi utama yang kinerja, umur pakai, dan keselamatannya sangat dipengaruhi oleh temperatur kerja. Sistem manajemen termal baterai (battery thermal management system, BTMS) berbasis material perubahan fasa (phase change material, PCM) menawarkan pendekatan pasif hemat energi untuk menjaga baterai pada rentang temperatur optimal 15–35 °C sekaligus menyeragamkan temperatur antar-sel. Tinjauan ini secara sistematis mengkaji potensi dua bio-PCM berbasis asam lemak, yaitu asam laurat dan asam stearat, sebagai media penyimpanan panas laten pada BTMS. Metode yang digunakan adalah studi literatur terstruktur terhadap lebih dari lima puluh jurnal bereputasi yang membahas dasar teori penyimpanan energi termal, sifat termofisik asam lemak, teori diagram fasa eutektik, teknik peningkatan kinerja, pemodelan numerik, serta penerapannya pada manajemen termal baterai. Hasil kajian menunjukkan bahwa asam laurat memiliki titik leleh 43–44 °C dengan panas laten ± 178 kJ/kg, sedangkan asam stearat meleleh pada 54–69 °C dengan panas laten 160–200 kJ/kg. Kedua bio-PCM bersifat terbarukan, tidak beracun, stabil secara kimia-termal, dan hampir tidak mengalami supercooling. Kendala berupa konduktivitas termal rendah (0,15–0,30 W/m·K) dan kebocoran saat pelelehan dapat diatasi melalui penambahan grafit tereksansi, nanopartikel karbon, dan busa logam, stabilisasi bentuk, enkapsulasi, serta pembentukan campuran eutektik asam laurat–asam stearat yang menurunkan titik leleh ke 34–37 °C sesuai jendela termal baterai. Penerapan pada konfigurasi komposit dan hibrida terbukti menekan temperatur puncak dan menyeragamkan temperatur antar-sel. Kajian menyimpulkan bahwa komposit bio-PCM asam laurat/asam stearat merupakan kandidat menjanjikan untuk BTMS berkelanjutan, dengan arah penelitian ke depan pada optimasi komposit, sistem hibrida, keandalan siklus jangka panjang, dan analisis tekno-ekonomi.

Kata kunci— bio-PCM, asam laurat, asam stearat, BTMS, baterai lithium-ion, penyimpanan panas laten, campuran eutektik, konduktivitas termal.

I. PENDAHULUAN

Transisi global menuju sistem transportasi rendah karbon telah mendorong adopsi kendaraan listrik (electric vehicle, EV) secara masif dalam satu dekade terakhir. Baterai lithium-ion (Li-ion) menjadi tumpuan utama penyimpanan energi pada EV karena memiliki densitas energi dan daya yang tinggi, efek memori rendah, efisiensi coulombik tinggi, serta laju swadischarge yang kecil [1], [2]. Namun, performa elektrokimia, laju penuaan, dan keselamatan baterai Li-ion sangat sensitif terhadap temperatur kerja. Operasi di luar

rentang temperatur ideal mempercepat degradasi kapasitas, meningkatkan resistansi internal, memicu ketidakseimbangan antar-sel, dan pada kondisi ekstrem dapat menimbulkan thermal runaway yang berbahaya [3], [4].

Rentang temperatur operasi optimal baterai Li-ion umumnya berada pada 15–35 °C, dengan selisih temperatur antar-sel yang dianjurkan tidak melebihi 5 °C untuk menjaga keseragaman kinerja dan umur pak baterai [5], [6]. Selama pengisian dan pengosongan berarus tinggi, panas dibangkitkan melalui pemanasan Joule akibat resistansi internal serta reaksi elektrokimia dan entropik. Jika tidak dikelola, kalor ini terakumulasi secara lokal dan memicu gradien temperatur yang merugikan. Oleh karena itu, sistem manajemen termal baterai (battery thermal management system, BTMS) menjadi komponen krusial untuk menjaga temperatur pak baterai dalam jendela aman [7], [8].

Secara umum BTMS diklasifikasikan menjadi pendinginan udara, pendinginan cairan, pipa kalor (heat pipe), sistem berbasis material perubahan fasa (phase change material, PCM), serta kombinasi hibrida di antaranya. Sistem berbasis PCM menarik perhatian besar karena bersifat pasif, tidak memerlukan energi pemompaan, memiliki struktur sederhana, andal, dan mampu menyerap kalor dalam jumlah besar pada temperatur nyaris konstan melalui penyimpanan panas laten [9]–[11]. PCM menyerap kalor ketika meleleh dan melepaskannya kembali saat memadat, sehingga efektif meredam lonjakan temperatur sekaligus menyeragamkan distribusi temperatur pada pak baterai [12], [13].

PCM organik berbasis asam lemak, atau bio-PCM, semakin dipertimbangkan sebagai alternatif berkelanjutan terhadap parafin turunan minyak bumi dan garam terhidrasi anorganik. Asam lemak diperoleh dari sumber nabati dan hewani terbarukan, bersifat tidak beracun dan tidak korosif terhadap sebagian besar polimer, memiliki kestabilan kimia dan termal yang baik, meleleh secara kongruen, serta menunjukkan supercooling yang dapat diabaikan [14]–[16]. Di antara berbagai asam lemak, asam laurat (C12) dan asam stearat (C18) menonjol karena ketersediaannya melimpah—terutama di Indonesia sebagai produsen minyak kelapa dan minyak sawit—serta titik lelehnya yang relevan dengan aplikasi termal temperatur sedang [16], [17].

Meskipun demikian, penerapan langsung asam laurat dan asam stearat pada BTMS masih terkendala konduktivitas termal yang rendah serta risiko kebocoran cairan saat fasa lelehnya. Berbagai penelitian telah mengembangkan strategi

peningkatan kinerja, mulai dari penambahan pengisi konduktif, stabilisasi bentuk, enkapsulasi, hingga pembentukan campuran eutektik untuk menyetel titik leleh. Namun, sintesis pengetahuan yang berfokus khusus pada pasangan asam laurat–asam stearat dalam konteks BTMS masih terbatas. Tinjauan ini bertujuan untuk (i) merangkum dasar teori penyimpanan energi termal dan sifat termofisik kedua bio-PCM; (ii) menganalisis kesesuaiannya dengan kebutuhan termal baterai Li-ion; (iii) mengulas teori dan sifat campuran eutektik biner keduanya; (iv) meninjau metode peningkatan kinerja dan pemodelan numerik; serta (v) merangkum penerapan, aspek keberlanjutan, dan prospeknya pada BTMS. Kajian ini diharapkan menjadi acuan bagi pengembangan komposit bio-PCM yang efisien dan ramah lingkungan.

II. METODE TINJAUAN

Tinjauan ini disusun menggunakan pendekatan studi literatur terstruktur. Penelusuran pustaka dilakukan terhadap basis data ilmiah bereputasi seperti ScienceDirect, SpringerLink, dan penerbit jurnal terindeks, dengan kata kunci gabungan meliputi "phase change material", "fatty acid PCM", "lauric acid", "stearic acid", "battery thermal management", "thermal conductivity enhancement", "eutectic mixture", dan "form-stable composite". Rentang publikasi yang dipertimbangkan mencakup literatur perintis di bidang penyimpanan energi termal hingga perkembangan terkini manajemen termal baterai.

Kriteria inklusi meliputi artikel jurnal, artikel tinjauan, dan prosiding yang membahas dasar teori penyimpanan energi termal, sifat termofisik asam lemak sebagai PCM, teknik peningkatan konduktivitas dan stabilisasi bentuk, teori campuran eutektik, pemodelan numerik perubahan fasa, serta penerapan PCM pada baterai Li-ion. Artikel yang tidak relevan dengan rentang temperatur BTMS atau tidak memuat data kuantitatif yang memadai dikecualikan. Data yang terhimpun kemudian disintesis secara kualitatif dan komparatif, difokuskan pada asam laurat dan asam stearat serta relevansinya terhadap jendela temperatur operasi baterai. Nilai sifat termofisik dari berbagai sumber disajikan sebagai rentang untuk mengakomodasi variasi kemurnian bahan dan metode pengukuran, khususnya differential scanning calorimetry (DSC) dan thermogravimetric analysis (TGA).

III. DASAR TEORI PENYIMPANAN ENERGI TERMAL

A. Klasifikasi Penyimpanan Energi Termal

Penyimpanan energi termal (thermal energy storage, TES) dikelompokkan menjadi penyimpanan panas sensibel, panas laten, dan termokimia. Penyimpanan panas sensibel memanfaatkan kenaikan temperatur medium tanpa perubahan fasa dan bergantung pada kalor jenis material. Penyimpanan panas laten (latent heat thermal energy storage, LHTES) memanfaatkan kalor yang diserap atau dilepaskan selama perubahan fasa pada temperatur mendekati konstan, sehingga menawarkan densitas penyimpanan energi yang jauh lebih tinggi dibanding penyimpanan sensibel pada rentang temperatur sempit [18], [19]. Penyimpanan termokimia bergantung pada kalor reaksi reversibel dan menawarkan densitas tertinggi namun kompleksitasnya paling besar. Untuk BTMS, LHTES berbasis PCM padat-cair paling

banyak digunakan karena rentang temperatur transisinya dapat disesuaikan dan perubahan volumenya kecil [20].

Kapasitas penyimpanan panas total suatu PCM yang mengalami transisi padat-cair dapat dinyatakan melalui gabungan kontribusi sensibel dan laten sebagai:

$$Q = m [c_{p,s} (T_m - T_i) + a \cdot \Delta H_f + c_{p,l} (T_f - T_m)]$$

dengan Q kalor tersimpan, m massa PCM, $c_{p,s}$ dan $c_{p,l}$ kalor jenis fasa padat dan cair, T_m temperatur leleh, T_i dan T_f temperatur awal dan akhir, a fraksi cair, serta ΔH_f panas laten pelelehan. Persamaan tersebut menegaskan bahwa panas laten ΔH_f merupakan penyumbang dominan kapasitas penyimpanan pada rentang temperatur sempit di sekitar titik leleh, sebagaimana yang dimanfaatkan pada BTMS [18], [19].

B. Kriteria Pemilihan PCM untuk BTMS

PCM ideal untuk BTMS harus memenuhi sejumlah kriteria termofisik, kinetik, kimia, dan ekonomi. Secara termofisik, PCM sebaiknya memiliki titik leleh dalam jendela operasi baterai (sekitar 30–50 °C), panas laten dan kalor jenis tinggi, konduktivitas termal memadai, densitas tinggi, serta perubahan volume kecil. Secara kinetik, supercooling harus minimal dan laju kristalisasi memadai. Secara kimia, PCM harus stabil, tidak beracun, tidak mudah terbakar, tidak korosif, dan mengalami pelelehan kongruen tanpa pemisahan fasa. Aspek ekonomi menuntut ketersediaan melimpah dan biaya rendah [15], [21], [22]. Asam laurat dan asam stearat memenuhi sebagian besar kriteria ini, dengan pengecualian utama pada konduktivitas termal yang rendah.

PCM secara umum dibedakan menjadi organik (parafin dan asam lemak), anorganik (garam terhidrasi dan logam), serta campuran eutektik. PCM organik unggul dalam kestabilan kimia, supercooling rendah, dan sifat non-korosif, tetapi umumnya berkonduktivitas termal rendah dan mudah terbakar. Garam terhidrasi memiliki panas laten dan konduktivitas lebih tinggi namun rentan pemisahan fasa serta supercooling. Campuran eutektik memungkinkan penyetelan titik leleh yang presisi [18], [22]. Sebagai subkelas PCM organik terbarukan, asam lemak menjadi fokus tinjauan ini.

Dalam konteks BTMS, parafin dan asam lemak adalah dua kandidat organik yang paling banyak diteliti. Parafin murah dan tersedia luas, tetapi berasal dari minyak bumi dan kurang berkelanjutan. Asam lemak menawarkan panas laten yang setara, supercooling yang lebih kecil, serta keunggulan lingkungan sebagai bahan terbarukan dan dapat terurai hayati. Keduanya sama-sama menghadapi kendala konduktivitas termal rendah, sehingga metode peningkatan kinerja yang dibahas pada tinjauan ini berlaku umum bagi kedua kelas. Pilihan pada asam laurat dan asam stearat dalam kajian ini dilandasi ketersediaan bahan baku nasional yang melimpah serta rentang titik leleh yang dapat disetel melalui pembentukan eutektik agar sesuai jendela termal baterai [14], [16].

IV. SISTEM MANAJEMEN TERMAL BATERAI

A. Kebutuhan Termal dan Pembangkitan Panas Baterai Li-ion

Kinerja optimal baterai Li-ion tercapai pada temperatur moderat. Temperatur terlalu rendah meningkatkan resistansi internal dan menurunkan kapasitas yang dapat digunakan serta berisiko pelapisan litium (lithium plating) saat pengisian; sebaliknya temperatur berlebih mempercepat

reaksi samping, penebalan lapisan solid electrolyte interphase (SEI), dan degradasi elektroda [3], [4]. Panas pada sel dibangkitkan dari komponen ireversibel (pemanasan Joule akibat resistansi ohmik dan polarisasi) serta komponen reversibel (perubahan entropi reaksi). Pada laju pengosongan tinggi, laju pembangkitan panas meningkat tajam sehingga akumulasi kalor menjadi signifikan [23], [24].

Selain nilai temperatur absolut, keseragaman temperatur antar-sel juga penting; gradien temperatur yang besar menimbulkan ketidakseragaman laju penuaan dan ketidakseimbangan tegangan pada pak baterai [5], [6]. Pada kondisi ekstrem, pemanasan lokal dapat memicu dekomposisi eksotermik berantai yang dikenal sebagai thermal runaway, yang berpotensi menyebabkan kebakaran atau ledakan. BTMS yang baik karenanya harus membatasi temperatur maksimum, menekan selisih temperatur antar-sel, serta menahan propagasi thermal runaway [24], [25].

B. Klasifikasi Sistem BTMS

Pendinginan udara memanfaatkan aliran udara paksa atau alami; sederhana dan murah, tetapi kapasitas pembuangan kalornya terbatas pada beban tinggi [5], [26]. Pendinginan cairan menawarkan koefisien perpindahan kalor lebih tinggi, namun menambah kompleksitas, bobot, dan konsumsi energi pemompaan [7]. Sistem pipa kalor efektif memindahkan kalor namun relatif mahal dan memerlukan integrasi cermat. Sebagai alternatif pasif, sistem berbasis PCM menyerap kalor melalui perubahan fasa tanpa bagian bergerak dan tanpa energi tambahan, sehingga meningkatkan keandalan sistem [9], [10]. Perbandingan ringkas karakteristik keempat metode disajikan pada Tabel I.

TABEL I
PERBANDINGAN METODE UTAMA SISTEM MANAJEMEN TERMAL BATERAI

Metode	Kelebihan	Keterbatasan
Udara	Sederhana, murah, ringan	Kapasitas rendah pada beban tinggi, keseragaman buruk
Cairan	Perpindahan kalor tinggi, terkendali	Kompleks, berat, butuh energi pompa
Pipa kalor	Konduktansi tinggi, respons cepat	Biaya tinggi, integrasi rumit
PCM (pasif)	Pasif, seragam, tanpa energi	Konduktivitas rendah, jenuh saat leleh penuh
Hibrida	Menggabungkan keunggulan, seimbang	Kompleksitas & biaya meningkat

Diringkas dari [5]–[13], [26].

C. Prinsip Kerja BTMS Berbasis PCM

BTMS berbasis PCM bekerja dengan menyelubungi atau menyisipkan PCM di antara sel baterai. Ketika temperatur sel melampaui titik leleh PCM, PCM menyerap kalor secara nyaris isothermal melalui pelelehan, menahan kenaikan temperatur baterai dan menyeragamkan distribusi panas; saat beban menurun, PCM memadat dan melepaskan kalor tersimpan sehingga siap untuk siklus berikutnya [10], [12]. Efektivitas sistem bergantung pada kesesuaian titik leleh dengan jendela termal baterai, besarnya panas laten, dan laju perpindahan kalor yang dibatasi oleh konduktivitas termal PCM. Keterbatasan utama muncul ketika PCM telah meleleh sepenuhnya dan kehilangan kemampuan menyerap kalor laten; hal ini melatarbelakangi pengembangan komposit konduktif dan sistem hibrida [11], [13].

D. Peran PCM dalam Mitigasi Propagasi Thermal Runaway

Selain pengendalian temperatur pada operasi normal, PCM berpotensi memperlambat propagasi thermal runaway antar-sel. Ketika satu sel mengalami thermal runaway, panas dalam jumlah besar dilepaskan secara mendadak; PCM di sekitar sel dapat menyerap sebagian energi tersebut melalui pelelehan, menurunkan laju kenaikan temperatur sel tetangga dan menunda atau mencegah reaksi berantai [24], [25]. Kemampuan ini sangat bergantung pada panas laten, kapasitas termal, dan konduktivitas efektif material di antara sel. Komposit PCM berpenguat grafit atau busa logam, yang memiliki konduktivitas lebih tinggi, menyebarkan kalor lebih cepat namun perlu diseimbangkan agar tidak justru mempercepat perambatan panas ke sel di sebelahnya.

Untuk asam laurat dan asam stearat, titik dekomposisi yang tinggi dan sifat tidak korosif menjadi keunggulan, tetapi sebagai bahan organik keduanya mudah terbakar sehingga aspek keselamatan pada kondisi thermal runaway perlu dievaluasi secara khusus. Strategi seperti penambahan zat penghambat api (flame retardant), enkapsulasi, atau kombinasi dengan pelat konduktif dan sistem pendinginan aktif dapat meningkatkan keamanan tanpa mengorbankan fungsi penyimpanan panas laten [24], [52]. Kajian eksperimental terhadap perilaku bio-PCM pada skenario penyalahgunaan termal masih terbatas dan menjadi arah penelitian yang penting bagi penerapan praktis di kendaraan listrik.

V. KARAKTERISTIK ASAM LAURAT DAN ASAM STEARAT SEBAGAI BIO-PCM

A. Asam Lemak sebagai Bio-PCM

Asam lemak jenuh memiliki rumus umum $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ dan berperilaku sebagai PCM organik yang andal. Keunggulan utamanya meliputi pelelehan kongruen tanpa pemisahan fasa, supercooling yang dapat diabaikan, panas laten tinggi, kestabilan termal-kimia sepanjang siklus berulang, serta sifat non-toksik dan terbarukan [14]–[16]. Titik leleh dan panas laten asam lemak meningkat seiring bertambahnya panjang rantai karbon, sehingga memungkinkan pemilihan material sesuai jendela temperatur aplikasi. Ikatan hidrogen antar-gugus karboksil menjelaskan panas laten yang relatif tinggi pada asam lemak dibanding hidrokarbon dengan panjang rantai serupa [16], [27]. Karakteristik ini menjadikan asam lemak kandidat menarik untuk LHTES dan manajemen termal elektronik maupun baterai [27], [28].

B. Asam Laurat (Asam Dodekanoat, C_{12})

Asam laurat merupakan asam lemak jenuh rantai menengah yang melimpah pada minyak kelapa dan minyak inti sawit, dua komoditas utama Indonesia. Berbagai literatur melaporkan titik leleh asam laurat pada 43–44 °C dengan panas laten pelelehan 176–187 kJ/kg [16], [29]. Densitas fasa padatnya sekitar 1007 kg/m³ dan fasa cair sekitar 870 kg/m³, dengan kalor jenis sekitar 2,0–2,4 kJ/kg·K [16], [30]. Konduktivitas termalnya rendah, umumnya sekitar 0,15 W/m·K pada fasa cair, yang menjadi keterbatasan utama untuk perpindahan kalor cepat [16], [29]. Titik lelehnya yang berada pada batas atas jendela operasi baterai menjadikan asam laurat efektif menyerap lonjakan panas selama beban tinggi, sekaligus menjadi komponen penting dalam pembentukan campuran eutektik bertitik leleh lebih rendah. Uji keandalan termal menunjukkan perubahan sifat yang

kecil setelah ratusan siklus, mengonfirmasi kesesuaiannya untuk aplikasi berulang [30], [31].

C. Asam Stearat (Asam Oktadekanoat, C18)

Asam stearat adalah asam lemak jenuh rantai panjang yang melimpah pada lemak nabati dan hewani. Titik lelehnya bergantung pada kemurnian, dengan rentang yang dilaporkan pada 54–69 °C dan panas laten 160–200 kJ/kg [16], [32]. Densitas padatnya sekitar 940–990 kg/m³ dengan kalor jenis sekitar 1,6–2,3 kJ/kg·K [32], [33]. Sebagaimana asam lemak lain, konduktivitas termalnya rendah, sekitar 0,17–0,30 W/m·K, sehingga kerap dikompositkan dengan bahan konduktif [33], [34]. Titik leleh asam stearat yang relatif tinggi kurang ideal bila digunakan tunggal untuk pembatasan temperatur baterai pada beban ringan, namun sangat bermanfaat sebagai komponen pengatur temperatur dalam campuran eutektik serta untuk aplikasi ambang temperatur lebih tinggi dan proteksi thermal runaway [34], [35].

TABEL II

SIFAT TERMOFISIK ASAM LAURAT, ASAM STEARAT, DAN PCM PEMANDING

Material	Tleleh (°C)	ΔHf (kJ/kg)	k (W/m·K)	ρ (kg/m ³)
Asam laurat	43–44	176–187	±0,15	870–1007
Asam stearat	54–69	160–200	0,17–0,30	940–990
Eutektik LA-SA	34–37	±180	±0,15	870–900
Parafin	40–60	150–250	0,20–0,25	760–900
Garam terhidrasi	30–60	180–300	0,5–0,7	1400–1600

Nilai disajikan sebagai rentang dari berbagai literatur [16], [18], [29]–[34].

D. Kesesuaian dengan Jendela Termal Baterai

Perbandingan pada Tabel II memperlihatkan bahwa asam laurat, dengan titik leleh 43–44 °C, mampu mengaktifkan penyerapan panas laten tepat ketika baterai mendekati batas atas temperatur amannya, sehingga efektif meredam lonjakan panas beban tinggi. Sebaliknya, asam stearat murni dengan titik leleh lebih tinggi lebih sesuai sebagai ambang cadangan atau untuk lingkungan bertemperatur tinggi. Fleksibilitas terbesar diperoleh melalui campuran eutektik asam laurat–asam stearat yang menurunkan titik leleh ke 34–37 °C, tepat di dalam jendela optimal baterai, sekaligus mempertahankan panas laten memadai [35], [36]. Kombinasi panas laten tinggi, supercooling rendah, sifat non-korosif terhadap polimer, dan keterbarukan menjadikan kedua bio-PCM ini menarik bagi BTMS berkelanjutan, meskipun konduktivitas termalnya perlu ditingkatkan.

E. Karakterisasi Termal dengan DSC dan TGA

Penentuan sifat termofisik asam laurat, asam stearat, dan turunan komposit maupun eutektiknya umumnya dilakukan melalui differential scanning calorimetry (DSC) dan thermogravimetric analysis (TGA). DSC mengukur temperatur onset pelelehan, temperatur puncak, serta panas laten dengan mengintegrasikan luas puncak endotermik pada termogram, sekaligus mengungkap ada-tidaknya supercooling melalui perbandingan kurva pemanasan dan pendinginan [29], [31]. Pada asam lemak, kurva pendinginan yang nyaris berimpit dengan kurva pemanasan menegaskan supercooling yang dapat diabaikan—keunggulan penting untuk BTMS karena PCM dapat memadat kembali tanpa membutuhkan pendinginan berlebih. Uji siklus DSC berulang ratusan hingga ribuan kali digunakan untuk menilai keandalan, dengan pergeseran titik leleh dan panas laten yang kecil menandakan stabilitas termal yang baik [31], [36].

TGA menentukan temperatur awal dekomposisi dan profil kehilangan massa terhadap temperatur, sehingga menetapkan batas temperatur operasi aman PCM. Asam laurat dan asam stearat menunjukkan kestabilan hingga temperatur jauh di atas jendela kerja baterai, dengan dekomposisi signifikan baru terjadi pada rentang ratusan derajat Celsius [29], [32]. Selain kedua teknik ini, spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) digunakan untuk memverifikasi bahwa pembentukan komposit atau eutektik bersifat fisik tanpa reaksi kimia yang merusak, sedangkan pemindaian mikroskop elektron (SEM) mengonfirmasi distribusi PCM di dalam matriks pendukung [40], [46]. Rangkaian karakterisasi ini menjadi standar dalam validasi bio-PCM sebelum penerapan pada BTMS.

VI. CAMPURAN EUTEKTIK ASAM LAURAT–ASAM STEARAT

Pembentukan campuran eutektik biner merupakan strategi ampuh untuk menyetel titik leleh agar tepat berada dalam jendela termal baterai. Suatu campuran eutektik meleleh dan memadat pada temperatur tunggal yang lebih rendah daripada titik leleh masing-masing komponen murni, dengan komposisi tertentu yang disebut komposisi eutektik. Temperatur dan komposisi eutektik campuran asam lemak dapat diperkirakan melalui persamaan Schrader berdasarkan kesetimbangan padat-cair ideal:

$$\ln X_i = (\Delta H_{f,i} / R)(1/T_{f,i} - 1/T_m)$$

dengan X_i fraksi mol komponen i , $\Delta H_{f,i}$ panas laten dan $T_{f,i}$ temperatur leleh komponen murni i , T_m temperatur eutektik, dan R konstanta gas universal. Perhitungan ini memberikan estimasi awal yang kemudian diverifikasi secara eksperimen menggunakan DSC untuk menentukan komposisi eutektik nyata [36], [37].

Untuk pasangan asam laurat–asam stearat, komposisi eutektik yang dilaporkan berkisar pada 75–80% asam laurat dan 20–25% asam stearat (basis massa), dengan temperatur leleh sekitar 34–37 °C dan panas laten sekitar 180 kJ/kg [35], [36]. Studi klasik menguji campuran eutektik asam laurat–asam stearat sebagai media penyimpan panas terenkapsulasi pada anulus dua pipa konsentrik dan memperoleh kinerja termal yang baik [35]. Penelitian terhadap berbagai campuran eutektik asam lemak, termasuk kombinasi biner dan terner, menegaskan kestabilan termal serta keandalan siklus yang tinggi untuk aplikasi temperatur rendah [37], [38]. Rentang titik leleh eutektik 34–37 °C ini sangat sesuai untuk BTMS karena berada di dalam jendela operasi optimal baterai, sehingga PCM aktif meredam panas sebelum baterai mencapai temperatur kritis.

TABEL III

SIFAT BEBERAPA CAMPURAN EUTEKTIK ASAM LEMAK

Campuran eutektik	Tleleh (°C)	ΔHf (kJ/kg)
Asam laurat–stearat	34–37	±180
Asam laurat–miristat	32–34	150–160
Asam laurat–palmitat	33–35	160–170
Asam miristat–stearat	44–46	180–190
Asam palmitat–stearat	50–52	180–190

Nilai indikatif dari berbagai studi eutektik asam lemak [35]–[38].

Persamaan Schrader mengasumsikan campuran cair ideal dan komponen padat yang saling tidak larut, sehingga estimasinya dapat menyimpang dari data eksperimen ketika interaksi antar-molekul asam lemak tidak ideal. Oleh sebab itu, penentuan diagram fasa lengkap melalui DSC pada

berbagai rasio komposisi tetap diperlukan untuk memperoleh titik eutektik yang akurat. Diagram fasa asam laurat–asam stearat memperlihatkan kurva likuidus yang menurun dari kedua sisi komponen murni dan bertemu pada titik eutektik dengan temperatur leleh minimum [37]. Pengetahuan ini penting untuk merancang bio-PCM dengan titik leleh yang tepat: pergeseran kecil komposisi dari titik eutektik akan memperlebar rentang leleh dan memunculkan zona dua fasa (mushy zone), yang dapat mengubah perilaku penyerapan panas pada BTMS. Selain campuran biner, campuran terner asam lemak menawarkan fleksibilitas lebih besar untuk menyetel temperatur transisi, meskipun dengan kompleksitas formulasi yang meningkat [38].

VII. METODE PENINGKATAN KINERJA

A. Peningkatan Konduktivitas Termal

Kendala paling menonjol dari asam laurat dan asam stearat adalah konduktivitas termal rendah ($0,15\text{--}0,30\text{ W/m}\cdot\text{K}$), yang memperlambat laju penyerapan dan pelepasan kalor sehingga membatasi respons termal terhadap fluktuasi beban baterai [16], [34]. Untuk mengatasinya, dikembangkan komposit PCM dengan bahan berkonduktivitas tinggi. Grafit tereksansi (expanded graphite, EG) menjadi salah satu pengisi paling efektif; strukturnya yang berpori menyerap PCM secara kapiler dan membentuk jaringan konduktif menerus, meningkatkan konduktivitas termal komposit secara signifikan tanpa banyak menurunkan panas laten [39], [40]. Penambahan grafit tereksansi dan serat karbon pada asam stearat dilaporkan meningkatkan konduktivitas termal beberapa kali lipat dibanding PCM murni [34].

Selain grafit tereksansi, bahan nano-karbon seperti carbon nanotube (CNT) dan grafena, busa logam (tembaga, nikel, aluminium), serta nanopartikel logam dan oksida logam juga digunakan untuk membentuk jaringan konduktif. Penambahan grafena dan CNT pada komposit PCM terbukti meningkatkan konduktivitas termal dan mempercepat respons termal pada aplikasi manajemen termal baterai [41], [42]. Matriks grafit dan busa logam memberikan peningkatan konduktivitas besar namun perlu diseimbangkan dengan penurunan fraksi PCM efektif dan penambahan bobot [43], [44]. Busa nikel berlapis grafena yang dijenuhi PCM, misalnya, menghasilkan pengendalian temperatur baterai yang superior [45]. Ringkasan beberapa hasil peningkatan konduktivitas disajikan pada Tabel IV.

TABEL IV
RINGKASAN PENINGKATAN KONDUKTIVITAS TERMAL KOMPOSIT PCM

Pengisi konduktif	Fraksi (%)	Efek pada k
Grafit tereksansi	5–20	meningkat 3–10×
Serat karbon	2–10	meningkat 2–4×
CNT / grafena	1–5	meningkat 2–3×
Busa logam (Cu/Ni)	porositas tinggi	meningkat 5–15×
Nanopartikel oksida	1–5	meningkat 1,2–2×

Rentang indikatif; nilai aktual bergantung metode & material [34], [39]–[45].

B. Stabilisasi Bentuk dan Pencegahan Kebocoran

Selama fasa cair, PCM murni berisiko bocor dari struktur penampungannya, yang dapat mencemari sel dan menurunkan performa. Solusinya adalah pembentukan PCM stabil-bentuk (form-stable) melalui impregnasi PCM ke dalam matriks pendukung berpori seperti grafit tereksansi, perlit

terekspansi, diatomit, silika, atau polimer pendukung [40], [46]. Matriks ini menahan PCM cair melalui gaya kapiler dan tegangan permukaan sehingga bentuk komposit tetap terjaga di atas titik leleh. Komposit asam stearat/silika dan asam lemak/perlit tereksansi merupakan contoh yang banyak diteliti dengan kapasitas penampungan tinggi [46], [47]. Blend asam lemak dengan polimer seperti poli(metil metakrilat) juga menghasilkan PCM stabil-bentuk dengan sifat penyimpanan panas baik [48].

C. Enkapsulasi Mikro dan Nano

Enkapsulasi mengurung PCM dalam cangkang polimer atau anorganik berukuran mikro hingga nano, mencegah kebocoran sekaligus memperluas luas permukaan perpindahan kalor dan melindungi PCM dari lingkungan. Mikroenkapsulasi dan nanoenkapsulasi asam lemak dan parafin telah dikembangkan menggunakan berbagai teknik seperti polimerisasi in-situ dan koaservasi [49], [50]. Nanoenkapsulasi menawarkan laju perpindahan kalor yang lebih cepat karena rasio luas-permukaan-terhadap-volume yang besar, meskipun fraksi cangkang yang tinggi dapat menurunkan kapasitas penyimpanan efektif [50]. Pemilihan material cangkang yang kompatibel dan tahan siklik menjadi kunci keberhasilan.

D. Keandalan Termal, Siklik, dan Kompatibilitas

Karena BTMS beroperasi melalui ribuan siklus leleh-beku, kestabilan termal dan siklik menjadi krusial. Asam lemak dan campuran eutektiknya umumnya menunjukkan perubahan titik leleh dan panas laten yang kecil setelah ratusan hingga ribuan siklus, mengindikasikan keandalan baik [31], [37]. Analisis TGA memperlihatkan dekomposisi asam lemak baru terjadi jauh di atas temperatur operasi baterai, sehingga aman digunakan pada rentang BTMS [31], [51]. Meski demikian, kompatibilitas dengan material wadah perlu diperhatikan karena asam lemak dapat bersifat sedikit korosif terhadap logam tertentu; pemilihan wadah polimer, pelapis pelindung, atau paduan tahan korosi dapat memitigasi hal ini [51], [52].

E. PCM Diperkaya Nanopartikel (Nano-PCM)

Pendekatan lain untuk meningkatkan kinerja adalah dispersi nanopartikel berkonduktivitas tinggi ke dalam matriks PCM membentuk nano-PCM. Nanopartikel karbon (grafena, CNT), logam (tembaga, perak), dan oksida logam (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2) telah digunakan untuk menaikkan konduktivitas termal efektif serta, dalam beberapa kasus, memodifikasi perilaku kristalisasi dan mengurangi supercooling [41], [60]. Nanopartikel silika, selain meningkatkan sifat termal, juga berfungsi menekan kebocoran dan perubahan volume PCM selama transisi fasa, sehingga menggabungkan manfaat peningkatan konduktivitas dan stabilisasi bentuk sekaligus [60].

Meskipun menjanjikan, penambahan nanopartikel menghadapi tantangan aglomerasi dan sedimentasi yang dapat menurunkan keseragaman serta kestabilan jangka panjang. Fraksi nanopartikel yang terlalu tinggi juga menurunkan panas laten efektif per satuan massa komposit dan meningkatkan viskositas fasa cair, yang melemahkan konveksi alami selama pelelehan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi fraksi, pemilihan surfaktan atau fungsionalisasi permukaan, serta evaluasi keandalan siklik yang cermat agar manfaat peningkatan konduktivitas tidak dikorbankan oleh penurunan kapasitas penyimpanan [33], [41], [60].

VIII. PENERAPAN PADA BTMS

A. Sistem BTMS Berbasis PCM dan Komposit

Konsep BTMS pasif berbasis PCM diperkenalkan secara pionir dengan menyelubungi sel baterai menggunakan PCM untuk menyerap kalor dan menyeragamkan temperatur tanpa energi tambahan [10], [53]. Studi simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa PCM efektif menekan temperatur puncak dan gradien temperatur antar-sel dibanding pendinginan udara pasif, khususnya pada laju pengosongan tinggi [12], [54]. Karena PCM murni berkonduktivitas rendah, penerapan umumnya menggunakan komposit PCM/grafit tereksansi atau PCM berpenguat sirip logam untuk mempercepat penyebaran kalor [40], [55]. Peningkatan konduktivitas komposit terbukti menurunkan temperatur maksimum pak baterai dan mempersempit selisih temperatur antar-sel [41], [55]. Prinsip yang sama dapat diterapkan pada komposit bio-PCM asam laurat/asam stearat, dengan titik leleh disetel melalui campuran eutektik agar sesuai jendela termal baterai.

B. Sistem Hibrida

Keterbatasan PCM murni pasif muncul saat PCM telah leleh sepenuhnya dan kehilangan kemampuan menyerap kalor; oleh karena itu sistem hibrida yang memadukan PCM dengan pendinginan udara, pendinginan cairan, atau pipa kalor dikembangkan agar PCM dapat memadat kembali dan siap untuk siklus berikutnya [13], [56]. Sistem hibrida PCM–udara paksa terbukti mempertahankan pengendalian temperatur pada operasi berkelanjutan dan siklus berulang [56]. Sistem PCM berbantu pipa kalor mempercepat pembuangan kalor tersimpan sehingga meningkatkan kinerja pada beban kontinu [57]. Rancangan pendinginan internal berbasis PCM untuk pak baterai silindris serta kombinasi dengan mini-channel juga menunjukkan potensi besar [58].

C. Pemodelan Numerik Perubahan Fasa

Analisis termal BTMS berbasis PCM banyak dilakukan melalui pemodelan numerik. Dua pendekatan yang lazim adalah metode entalpi (enthalpy method) dan metode kapasitas panas efektif (effective heat capacity), yang menangani pelepasan panas laten pada antarmuka padat-cair yang bergerak [59]. Simulasi computational fluid dynamics memungkinkan prediksi distribusi temperatur, fraksi cair, dan pengaruh konveksi alami pada zona leleh, sehingga mempercepat optimasi desain sebelum eksperimen [59], [60]. Validasi terhadap data eksperimen tetap diperlukan mengingat sensitivitas hasil terhadap sifat termofisik dan konduktivitas efektif komposit.

D. Ringkasan Studi dan Metrik Kinerja

Efektivitas BTMS berbasis PCM dievaluasi terutama melalui temperatur maksimum pak baterai, selisih temperatur antar-sel, durasi pengendalian temperatur di dalam jendela aman, dan kemampuan pemadatan ulang. Tabel V merangkum beberapa pendekatan representatif. Kajian menyeluruh menegaskan bahwa integrasi PCM—terutama dalam bentuk komposit konduktif dan sistem hibrida—memberikan keseimbangan terbaik antara kesederhanaan, efisiensi energi, dan pengendalian temperatur [1], [8].

TABEL V

RINGKASAN PENDEKATAN BTMS BERBASIS PCM

Pendekatan	Material	Temuan utama
PCM pasif	Parafin/asam lemak	Temperatur puncak & gradien turun vs udara
Komposit	PCM/grafit tereksansi	Konduktivitas naik, Tmaks turun
Sirip logam	PCM + sirip	Penyebaran kalor lebih merata
Hibrida PCM–udara	PCM + udara paksa	Pemadatan ulang, kinerja kontinu
Hibrida PCM–pipa kalor	PCM + heat pipe	Pembuangan kalor cepat

Diringkas dari [12], [13], [53]–[58].

E. Studi Kasus Terpilih

Sejumlah studi memberikan gambaran konkret potensi PCM pada BTMS yang relevan untuk komposit bio-PCM. Rancangan pak baterai skuter listrik yang diselubungi PCM terbukti mempertahankan temperatur sel jauh lebih rendah dan lebih seragam dibanding konfigurasi tanpa PCM pada siklus beban tinggi, sekaligus menunda tercapainya temperatur kritis [53]. Perbandingan langsung antara pendinginan udara aktif dan PCM pasif menunjukkan bahwa PCM lebih unggul dalam menekan gradien temperatur antar-sel, terutama pada kondisi beban tinggi dan temperatur lingkungan ekstrem [12]. Temuan-temuan ini menegaskan keunggulan intrinsik pendekatan panas laten dalam menyeragamkan temperatur.

Untuk mengatasi keterbatasan konduktivitas, komposit PCM/grafit tereksansi pada pak baterai Li-ion menurunkan temperatur maksimum secara nyata dibanding PCM murni, dengan fraksi grafit yang dioptimasi agar tidak terlalu mengorbankan panas laten [43]. Pada operasi berkelanjutan, sistem hibrida yang memadukan PCM dengan pendinginan udara paksa mampu mengembalikan PCM ke fasa padat di antara siklus, sehingga mempertahankan efektivitas jangka panjang yang tidak dapat dicapai PCM pasif tunggal [56]. Sistem PCM stabil-bentuk pada baterai prismatic juga menunjukkan pengendalian temperatur yang baik tanpa risiko kebocoran [55]. Bila prinsip-prinsip ini diterapkan pada eutektik asam laurat–asam stearat yang diperkuat pengisi konduktif, diharapkan diperoleh BTMS pasif-hibrida yang efektif sekaligus berkelanjutan.

F. Perbandingan dengan PCM Konvensional

Dibandingkan parafin yang paling lazim digunakan pada BTMS, bio-PCM asam laurat dan asam stearat menawarkan panas laten yang setara atau lebih tinggi, supercooling yang lebih kecil, serta keunggulan keberlanjutan sebagai bahan terbarukan. Keduanya sama-sama menghadapi kendala konduktivitas termal rendah, sehingga strategi peningkatan yang telah terbukti efektif pada komposit parafin—grafit tereksansi, busa logam, sirip, dan enkapsulasi—dapat diadopsi langsung untuk bio-PCM [39], [40], [43]. Perbedaan penting terletak pada kemampuan penyetelan titik leleh: melalui pembentukan eutektik biner asam laurat–asam stearat, titik leleh dapat diarahkan tepat ke jendela optimal baterai tanpa memerlukan sintesis parafin dengan fraksi karbon spesifik.

Dibandingkan garam terhidrasi, asam lemak memiliki panas laten dan konduktivitas yang lebih rendah, namun unggul karena bebas dari masalah pemisahan fasa dan supercooling parah yang kerap menyulitkan penerapan garam terhidrasi pada siklus berulang [18], [22]. Dengan demikian, pada rentang temperatur BTMS, bio-PCM asam laurat/asam stearat menempati posisi yang menarik: menggabungkan

keandalan siklus PCM organik, penyetelan temperatur melalui eutektik, dan keberlanjutan bahan baku, dengan satu-satunya kelemahan utama—konduktivitas termal—yang telah memiliki solusi rekayasa yang matang.

IX. ASPEK KEBERLANJUTAN DAN TEKNO-EKONOMI

Salah satu daya tarik utama bio-PCM asam laurat dan asam stearat adalah keberlanjutannya. Kedua bahan berasal dari sumber nabati terbarukan, dapat terurai secara hayati, tidak beracun, dan memiliki jejak karbon lebih rendah dibanding parafin turunan minyak bumi [14], [16]. Bagi Indonesia sebagai produsen utama minyak kelapa dan minyak sawit, ketersediaan bahan baku melimpah membuka peluang rantai pasok lokal yang ekonomis dan mendukung nilai tambah komoditas nasional. Analisis siklus hidup diperlukan untuk mengukur manfaat lingkungan secara menyeluruh, termasuk dampak penggunaan lahan dan proses pemurnian.

Dari sisi tekno-ekonomi, biaya bio-PCM bersaing dengan parafin, sedangkan penambahan pengisi konduktif seperti grafit tereksansi atau busa logam meningkatkan biaya dan bobot yang harus diseimbangkan dengan perolehan kinerja termal. Optimasi fraksi pengisi, pemilihan matriks stabilisasi yang murah, serta skema hibrida yang hemat energi menjadi kunci kelayakan ekonomi penerapan pada skala pak baterai kendaraan [21], [43]. Kajian tekno-ekonomi yang komprehensif masih terbatas dan menjadi peluang penelitian penting.

X. TANTANGAN DAN ARAH PENELITIAN

Beberapa arah penelitian penting dapat diidentifikasi dari sintesis literatur. Pertama, optimasi komposisi eutektik asam laurat-asam stearat untuk menyetel titik leleh secara presisi pada jendela optimal baterai sekaligus memaksimalkan panas laten. Kedua, pengembangan komposit bio-PCM stabil-bentuk berbasis grafit tereksansi, grafena, atau busa logam guna mengatasi konduktivitas rendah dan kebocoran secara simultan [39], [43]. Ketiga, integrasi bio-PCM dalam sistem hibrida bersama pendinginan cairan atau pipa kalor untuk menjamin pemadatan ulang pada operasi berkelanjutan [56], [57].

Keempat, evaluasi keandalan siklus jangka panjang, kompatibilitas material wadah, serta kinerja pada kondisi penyalahgunaan termal dan pencegahan propagasi thermal runaway [24], [52]. Kelima, pengembangan model numerik multiskala yang tervalidasi untuk komposit bio-PCM guna mempercepat desain [59], [60]. Keenam, analisis siklus hidup dan tekno-ekonomi menyeluruh untuk menegaskan keunggulan keberlanjutan bio-PCM dibanding parafin turunan fosil. Ketujuh, eksplorasi campuran terner asam lemak dan bio-PCM baru dari sumber lokal untuk memperluas rentang temperatur transisi. Pengembangan pada arah-arrah ini akan mempercepat penerapan praktis komposit bio-PCM asam laurat/asam stearat pada BTMS.

XI. KESIMPULAN

Tinjauan ini mengkaji potensi asam laurat dan asam stearat sebagai bio-PCM untuk sistem manajemen termal baterai. Asam laurat (titik leleh 43–44 °C; panas laten ±178 kJ/kg) dan asam stearat (54–69 °C; 160–200 kJ/kg) merupakan PCM organik terbarukan, tidak beracun, stabil, dengan supercooling yang dapat diabaikan. Titik leleh keduanya dapat disetel ke rentang optimal baterai (34–37 °C)

melalui pembentukan campuran eutektik biner, yang temperatur dan komposisinya dapat diperkirakan dengan persamaan Schrader dan diverifikasi melalui DSC, menjadikannya sangat relevan bagi BTMS.

Kendala utama berupa konduktivitas termal rendah dan kebocoran dapat diatasi melalui komposit dengan grafit tereksansi, nano-karbon, dan busa logam, stabilisasi bentuk, serta enkapsulasi mikro/nano. Penerapan pada BTMS—terutama dalam konfigurasi komposit dan hibrida yang didukung pemodelan numerik—mampu menekan temperatur puncak dan menyeragamkan temperatur antar-sel. Ditinjau dari keberlanjutan, ketersediaan bahan baku nabati yang melimpah, khususnya di Indonesia, memperkuat daya tariknya. Dengan optimasi komposisi, peningkatan konduktivitas, validasi keandalan siklus jangka panjang, dan kajian tekno-ekonomi, komposit bio-PCM asam laurat/asam stearat berpotensi menjadi solusi manajemen termal baterai yang efisien sekaligus berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang atas dukungan yang diberikan dalam penyusunan tinjauan ini.

REFERENSI

- [1] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 106–128, 2016.
- [2] G. Karimi and X. Li, "Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles," *International Journal of Energy Research*, vol. 37, no. 1, pp. 13–24, 2013.
- [3] T. M. Bandhauer, S. Garimella, and T. F. Fuller, "A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 158, no. 3, pp. R1–R25, 2011.
- [4] A. A. Pesaran, "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations," *Journal of Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 377–382, 2002.
- [5] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4554–4571, 2011.
- [6] J. Zhao, Z. Rao, and Y. Li, "Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 157–165, 2015.
- [7] A. A. Pesaran, S. Santhanagopalan, and G. H. Kim, "Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications," in *Proc. 30th Int. Battery Seminar*, 2013.
- [8] K. Chen, Y. Chen, Y. She, M. Song, S. Wang, and L. Chen, "Construction of effective symmetrical air-cooled system for battery thermal management," *Applied Thermal Engineering*, vol. 166, pp. 114679, 2020.
- [9] S. Al-Hallaj and J. R. Selman, "A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 147, no. 9, pp. 3231–3236, 2000.
- [10] Z. Ling, Z. Zhang, G. Shi, X. Fang, et al., "Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 427–438, 2014.
- [11] L. Ianniciello, P. H. Biwolé, and P. Achard, "Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials," *Journal of Power Sources*, vol. 378, pp. 383–403, 2018.
- [12] R. Sabbah, R. Kizilel, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs," *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 630–638, 2008.
- [13] J. Jaguemont, N. Omar, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, "Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 132, pp. 308–320, 2018.
- [14] D. Rozanna, T. G. Chuah, A. Salmiah, T. S. Y. Choong, and M. Sa'ari, "Fatty acids as phase change materials (PCMs) for thermal energy

- storage: A review," *International Journal of Green Energy*, vol. 1, no. 4, pp. 495–513, 2004.
- [15] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.
- [16] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, and Y. He, "Fatty acids as phase change materials: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 482–498, 2014.
- [17] M. M. Kenisarin and K. Mahkamov, "Solar energy storage using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 9, pp. 1913–1965, 2007.
- [18] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003.
- [19] A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials," *Solar Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313–332, 1983.
- [20] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, "An overview of thermal energy storage systems," *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, 2018.
- [21] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, and M. Smyth, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 615–628, 2010.
- [22] K. Pielichowska and K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy storage," *Progress in Materials Science*, vol. 65, pp. 67–123, 2014.
- [23] X. Duan and G. F. Naterer, "Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 23–24, pp. 5176–5182, 2010.
- [24] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246–267, 2018.
- [25] N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, and B. S. Yilbas, "Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 72, pp. 690–703, 2014.
- [26] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 8–9, pp. 1047–1057, 2008.
- [27] A. Hasan, "Phase change material energy storage system employing palmitic acid," *Solar Energy*, vol. 52, no. 2, pp. 143–154, 1994.
- [28] N. Nallusamy, S. Sampath, and R. Velraj, "Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1206–1227, 2007.
- [29] A. Sari, "Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 14, pp. 2277–2287, 2003.
- [30] A. Karaipekli and A. Sari, "Capric-myristic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 2599–2605, 2008.
- [31] M. K. Rathod and J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 246–258, 2013.
- [32] Y. Wang, T. D. Xia, H. Zheng, and H. X. Feng, "Stearic acid/silica fume composite as form-stable phase change material for thermal energy storage," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 9, pp. 2365–2370, 2011.
- [33] S. Wu, T. Yan, Z. Kuai, and W. Pan, "Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 25, pp. 251–295, 2020.
- [34] A. Karaipekli, A. Sari, and K. Kaygusuz, "Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2201–2210, 2007.
- [35] A. Sari and K. Kaygusuz, "Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes," *Solar Energy*, vol. 72, no. 6, pp. 493–504, 2002.
- [36] A. Sari, "Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 14–15, pp. 2100–2107, 2005.
- [37] H. Ke, "Phase diagrams, eutectic mass ratios and thermal energy storage properties of multiple fatty acid eutectics as novel solid-liquid phase change materials," *Thermochimica Acta*, vol. 653, pp. 41–50, 2017.
- [38] J. Kant, A. Shukla, and A. Sharma, "Ternary mixture of fatty acids as phase change materials for thermal energy storage applications," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 274–279, 2016.
- [39] A. Sari and A. Karaipekli, "Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 8–9, pp. 1271–1277, 2007.
- [40] Z. Zhang and X. Fang, "Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 3, pp. 303–310, 2006.
- [41] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, and Y. Hu, "Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for battery thermal management," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 120, pp. 33–41, 2018.
- [42] A. Mills, M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1652–1661, 2006.
- [43] G. Jiang, J. Huang, Y. Fu, M. Cao, and M. Liu, "Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management," *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1119–1125, 2016.
- [44] Y. Lv, X. Yang, X. Li, G. Zhang, *et al.*, "Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins," *Applied Energy*, vol. 178, pp. 376–382, 2016.
- [45] A. Hussain, I. H. Abidi, C. Y. Tso, K. C. Chan, Z. Luo, and C. Y. H. Chao, "Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 124, pp. 23–35, 2018.
- [46] A. Sari and A. Karaipekli, "Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for energy storage," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 109, no. 2–3, pp. 459–464, 2008.
- [47] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011.
- [48] C. Alkan and A. Sari, "Fatty acid/poly(methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage," *Solar Energy*, vol. 82, no. 2, pp. 118–124, 2008.
- [49] G. Fang, H. Li, F. Yang, X. Liu, and S. Wu, "Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage," *Chemical Engineering Journal*, vol. 153, no. 1–3, pp. 217–221, 2009.
- [50] C. Liu, Z. Rao, J. Zhao, Y. Huo, and Y. Li, "Review on nanoencapsulated phase change materials: Preparation, characterization and heat transfer enhancement," *Nano Energy*, vol. 13, pp. 814–826, 2015.
- [51] P. K. S. Rathore and S. K. Shukla, "Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review," *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 723–744, 2019.
- [52] M. Kenisarin and K. Mahkamov, "Passive thermal control in residential buildings using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 371–398, 2016.
- [53] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter," *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292–307, 2004.
- [54] Z. Rao, S. Wang, and G. Zhang, "Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO₄ power battery," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 12, pp. 3408–3414, 2011.
- [55] W. Wu, W. Wu, and S. Wang, "Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 121, pp. 967–977, 2018.
- [56] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, and Z. Zhang, "A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling," *Applied Energy*, vol. 148, pp. 403–409, 2015.
- [57] W. Wu, X. Yang, G. Zhang, K. Chen, and S. Wang, "Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 486–492, 2017.

- [58] R. Zhao, J. Gu, and J. Liu, "Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design," *Energy*, vol. 135, pp. 811–822, 2017.
- [59] V. R. Voller and C. Prakash, "A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 30, no. 8, pp. 1709–1719, 1987.
- [60] Y. Lv, W. Situ, X. Yang, G. Zhang, and Z. Wang, "A novel nanosilica-enhanced phase change material with anti-leakage and anti-volume-changes properties for battery thermal management," *Energy Conversion and Management*, vol. 163, pp. 250–259, 2018.