

Phase Change Materials for Building Applications: A Review

I. M. Astika*, I. N. S. Winaya, I. D. G. A. Subagia, I. K. G. Wirawan,
I. G. N. Nitya Santhiarsa, I. K. Suarsana, I. G. N. Priambadi, I. G. K. Dwijana

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran,
Badung, Bali 80361, Indonesia

*Corresponding author: imdastika@yahoo.com

Abstract. The rapid growth of population, economic and technology has lead to greater energy demand. At present, the building sector is the dominant energy user. The use of renewable energy, such as PCM is one alternative to reduce energy consumption in buildings. Phase change materials (PCMs) is a material that can absorb and store heat energy when there is a surplus and release it when there is a deficit using the principle of Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES). Phase change material has shown great potential as an alternative for future energy systems. This is because phase change materials can be applied over a wide temperature range and are suitable for various heat storage system designs. Organic, inorganic and eutectic PCM are a type of phase change material in terms of their chemical composition. In this paper will be analyzed the advantages and disadvantages of PCM material is applied on building. Will also be reviewed various methods to integrate the PCM material into the construction of buildings with passive system. The general conclusion is that incorporating PCM materials into building construction allows more dynamic energy use. The benefits of using PCM in buildings mainly revolves around the overall decrease in energy usage with a decrease in peak load required for heating or cooling and increase thermal comfort by reducing temperature fluctuations.

Abstrak. Seiring cepatnya pertumbuhan dan perkembangan masyarakat, ekonomi dan teknologi menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi. Saat ini, pemakaian energi terbesar berasal dari sektor bangunan. Pemanfaatan energi terbarukan seperti PCM adalah salah satu alternatif untuk mengurangi penggunaan energi yang berasal dari fosil. Bahan berubah fase (*Phase Change Material/PCM*) adalah material yang dapat menyerap dan menyimpan energi khususnya energi panas ketika ada surplus dan melepaskannya ketika ada defisit menggunakan prinsip *Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)*. PCM telah menunjukkan potensi yang besar sebagai salah satu alternatif untuk sistem energi masa depan. Hal ini disebabkan karena PCM dapat diaplikasikan pada rentang suhu yang luas dan cocok diterapkan pada berbagai desain sistem penyimpanan panas. Berdasarkan komposisi kimianya, bahan yang digunakan sebagai PCM dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu senyawa organik, senyawa anorganik dan eutektik atau campuran eutektik. Dalam paper ini ditelaah kelebihan dan kekurangan bahan PCM yang diaplikasikan pada bangunan. Juga akan ditinjau berbagai metode untuk mengintegrasikan bahan PCM ke dalam konstruksi bangunan dengan sistem pasif. Kesimpulan secara umum didapatkan bahwa dengan menggabungkan material PCM ke dalam konstruksi bangunan memungkinkan penggunaan energi yang lebih dinamis. Manfaat dari menggunakan PCM di gedung-gedung terutama berkisar pada penurunan penggunaan energi secara keseluruhan dengan penurunan beban puncak yang diperlukan untuk pemanasan atau pendinginan dan peningkatan kenyamanan termal dengan mengurangi fluktuasi suhu.

Kata kunci: jenis material berubah fase, aplikasi PCM, bangunan

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

1. Pendahuluan

Penggunaan energi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, teknologi dan perkembangan penduduk. Sebagian besar energi yang digunakan diseluruh dunia berasal dari bahan bakar fosil yang menyebabkan terjadinya

perubahan iklim akibat pemanasan global dan semakin menguras ketersediaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi. Salah satu tindakan yang akan menguntungkan ditinjau dari penggunaan energi secara global adalah meningkatkan efisiensi energi bangunan, karena sektor bangunan adalah konsumen energi utama dan menyumbang sekitar

40% dari total penggunaan energi. Sebagian besar dari penggunaan energi ini berhubungan langsung dengan pemanasan dan pendinginan bangunan [1].

Alternatif untuk memenuhi meningkatnya permintaan energi dan mengurangi dampak negatif lingkungan adalah dengan mengurangi penggunaan energi dan dikombinasikan dengan pemanfaatan dari teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Sumber energi terbarukan diantaranya adalah bersumber dari tenaga air, energi angin dan energi matahari, atau teknologi baru seperti energi air laut dan sistem panas bumi. Integrasi beberapa teknologi ini juga dapat bermanfaat, misalnya membangun photovoltaics terintegrasi (BIPV) [2].

Beberapa teknologi baru muncul untuk membantu mewujudkan tujuan mengurangi penggunaan energi pada bangunan. Beberapa teknologi ini terkait dengan bahan isolasi termal yang diterapkan dalam membangun [3-5]. Salah satu teknologi bahan yang meskipun bukan bahan isolasi termal itu sendiri, adalah teknologi yang menjanjikan dari bahan-bahan berubah fasa (PCM) yang telah mendapat perhatian besar selama beberapa dekade terakhir. PCM menggunakan prinsip penyimpanan panas laten (*Laten Heat Thermal Storage/LHTS*) untuk menyerap energi dalam jumlah besar ketika ada surplus dan melepaskannya ketika ada defisit. Penggunaan PCM yang sesuai dengan temperatur dan tujuan penggunaannya dapat mengurangi penggunaan energi untuk pemanasan dan pendinginan. Memungkinkan juga untuk mendisain dimensi yang lebih kecil dari peralatan teknis untuk pemanasan dan pendinginan. Manfaat tambahan adalah kemampuan untuk mempertahankan suhu dalam ruangan yang lebih nyaman karena fluktuasi suhu yang lebih kecil. Selama beberapa tahun terakhir telah ditulis beberapa ulasan tentang penggunaan PCM di gedung untuk sistem penyimpanan energi termal dan tujuan kenyamanan suhu dalam ruangan [6-8], dan jelas menunjukkan bahwa minat peneliti dan penggunaan bahan PCM meningkat di seluruh dunia. Aplikasi PCM meliputi ban banyak area. Beberapa area yang telah dipelajari meliputi sistem ventilasi, sistem pemanas dan pendingin pasif, lantai, atap dan papan dinding. PCM juga dapat dimasukkan secara langsung ke dalam bahan bangunan seperti beton [9] dan papan dinding [10], memungkinkan mereka untuk diaplikasikan dalam konstruksi dengan perubahan minimal pada desain aslinya.

2. Material Berubah Fase

Bahan-bahan berubah fasa (PCM) memanfaatkan panas laten dari perubahan fasa untuk mengontrol suhu dalam kisaran tertentu.

Ketika suhu naik di atas titik tertentu, ikatan kimia dalam material akan mulai putus dan material akan menyerap panas dalam proses endotermik di mana material berubah dari padat menjadi cair. Saat suhu turun, bahan akan mengeluarkan energi dan kembali ke keadaan padat. Energi yang digunakan untuk mengubah fase material, dimana perubahan fase terjadi di sekitar suhu kenyamanan yang diinginkan, akan menyebabkan suhu dalam ruangan menjadi lebih stabil dan nyaman, serta mengurangi beban puncak pendinginan dan beban pemanasan [8]. Prinsip dasar dari material berubah fasa ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip dasar material berubah fase

Oleh karena itu, bahan-bahan perubahan fasa dapat memberikan peningkatan kapasitas penyimpanan panas, terutama pada bangunan dengan massa termal rendah. Kisaran suhu bervariasi tergantung pada bahan yang digunakan sebagai bahan berubah fasa (PCM).

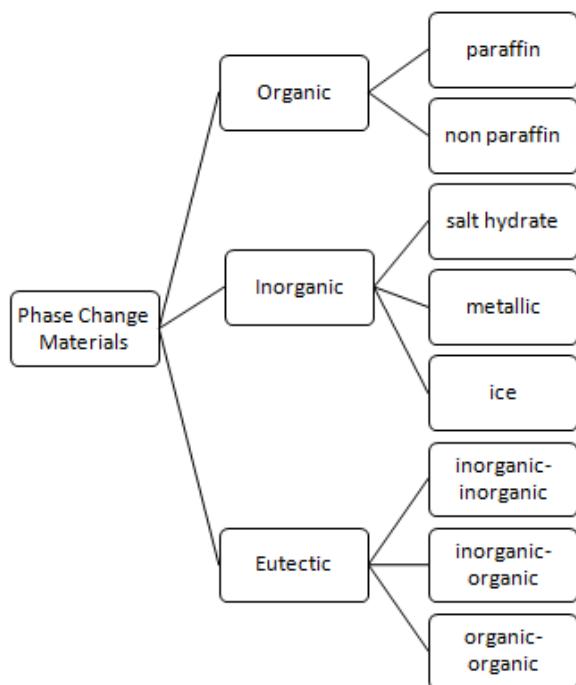
2.1 Kategori umum bahan berubah fase

Ada beberapa bahan yang bisa digunakan sebagai PCM. Berdasarkan komposisi kimianya, bahan PCM dapat dibagi menjadi tiga yaitu organik, anorganik, dan eutektik. Kategori ini selanjutnya dibagi berdasarkan berbagai komponen PCM seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 2 menunjukkan perbedaan dalam entalpi leleh dan suhu leleh untuk beberapa bahan yang paling umum digunakan sebagai PCM.

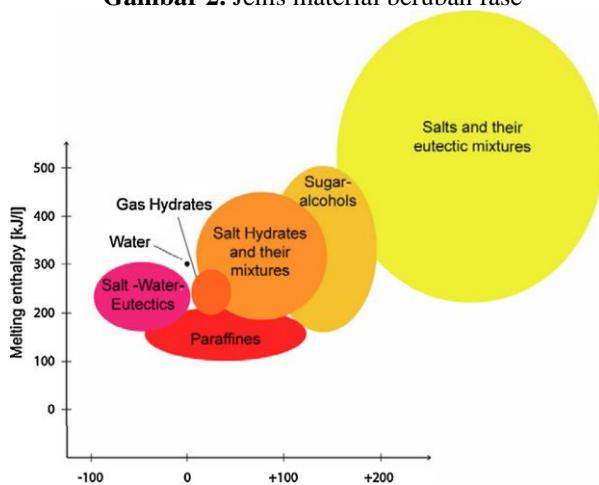
2.1.1. Organik

Bahan berubah fasa organik dibagi menjadi parafin dan non-parafin. Secara umum, PCM organik tidak mengalami pemisahan fase dan mengkristal dengan sedikit atau tanpa *super cooling* [12]. Parafin tersedia dalam kisaran suhu yang besar (Gambar. 2) yang terbuka untuk

digunakan di berbagai bidang. PCM organik dengan pemanfaatan panas latent berbasis massa, tidak menunjukkan tanda-tanda pemisahan fase setelah digunakan berulang kali melalui transisi padat-cair, dan memiliki tekanan uap rendah [13]. Namun, parafin yang digunakan sebagai PCM memiliki beberapa kelemahan. Konduktivitas termal yang rendah (sekitar 0,2 W/(m K)), tidak kompatibel dengan wadah plastik dan mudah terbakar.



Gambar 2. Jenis material berubah fase



Gambar. 3. Entalpi leleh versus suhu leleh untuk berbagai bahan yang digunakan dalam PCM [11].

Non parafin yang digunakan sebagai PCM termasuk dintaranya asam lemak, ester asam lemak dan alkohol, glikol, dll. Asam lemak telah menjadi perhatian terbesar untuk digunakan sebagai PCM pada bangunan. Ulasan ekstensif tentang asam lemak yang digunakan untuk keperluan PCM telah ditulis oleh Yuan dkk. [14]. Dalam ulasan ini asam lemak dan ester serta alkoholnya ditinjau

potensinya sebagai PCM. Asam lemak yang paling potensial digunakan sebagai PCM adalah asam laurat, asam miristat, asam palmitat dan asam stearat. Seperti parafin, bahan ini juga memiliki konduktivitas termal yang rendah, berkisar antara 0,15 hingga 0,17 W/(m.K). Secara keseluruhan, PCM organik memiliki banyak kelebihan yang membuatnya layak digunakan sebagai PCM yang diaplikasikan pada bangunan. Namun, karena PCM organik mudah terbakar yang menjadi kekurangan dari bahan tersebut dan mempengaruhi aspek keselamatan PCM organik ketika diaplikasikan pada bangunan.

2.1.2. Anorganik

Bahan-bahan berubah fasa anorganik yang paling dikenal terdiri dari garam dan logam terhidrasi. Namun untuk aplikasi bangunan, logam tidak berada dalam kisaran suhu yang diinginkan (seperti ditunjukkan pada Gambar 3). Oleh karena itu, PCM anorganik tidak akan dibahas lebih lanjut dalam ulasan ini. Garam terhidrasi terdiri dari paduan garam anorganik dan air sehingga penggunaan PCM jenis ini akan dapat menghemat biaya karena ketersediaan mudah dan biaya rendah. Transformasi perubahan fase melibatkan hidrasi atau dehidrasi garam dalam suatu proses yang menyerupai pelelehan dan pembekuan yang khas. Garam hidrat dapat meleleh menjadi garam hidrat yang mengandung lebih sedikit air atau ke bentuk anhidrat di mana garam dan air terpisah sepenuhnya. Sifat yang diinginkan dari hidrat garam yang digunakan sebagai PCM termasuk panas latent per unit volume yang tinggi, konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada PCM organik dan perubahan volume kecil dan ketersediaan mudah dengan biaya lebih rendah. Garam terhidrasi yang cocok untuk penggunaan komersial mengalami pencairan yang tidak sesuai. Ini adalah masalah khas untuk garam terhidrasi karena proses peleburan dalam banyak kasus menyebabkan garam melepaskan air dan berubah menjadi garam dalam bentuk anhidratnya, atau garam yang berbeda. Kepadatan garam anhidrat mungkin lebih tinggi, menyebabkannya tenggelam ke dasar wadah. Ketika suhu mencapai titik beku, garam akan menumpuk di bagian bawah dan beberapa garam tidak akan dapat menyerap kembali air. Oleh karena itu, total volume garam yang dapat mengalami perubahan fase menjadi berkurang dan efektivitas PCM menurun. Masalah lain dari garam terhidrasi adalah *super cooling*, yang terjadi karena sifat nukleasi yang buruk di banyak garam hidrat. Ketika *super cooling* terjadi, fase cair PCM tidak membeku pada suhu yang diinginkan, tetapi mencapai suhu lebih rendah dari titik beku sebelum benar-benar mengeras. Ini

adalah cacat kritis karena akan mengubah suhu perubahan fasa.

2.1.3. Campuran eutektik

Komposisi dari eutektik terdiri dari dua atau lebih komponen yang masing-masing meleleh dan membeku selaras. Selama fase kristalisasi, campuran komponen terbentuk, dan bertindak sebagai komponen tunggal. Komponen membeku menjadi campuran kristal yang menjadi satu kesatuan dan meleleh secara bersamaan tanpa pemisahan [15]. Eutektik dapat berupa campuran senyawa organik dan atau anorganik. Oleh karena itu, eutektik dapat dibuat sebagai campuran organik-organik, anorganik-anorganik atau organik-anorganik [8]. Ini memberi ruang untuk berbagai kombinasi yang dapat disesuaikan untuk aplikasi yang spesifik. Dari campuran eutektik organik, yang paling umum diteliti terdiri dari asam lemak. Beberapa eutektik organik yang telah dipelajari meliputi asam kaprat/asam miristat, asam laurat/asam stearat, asam miristat/asam palmitat dan asam palmitat/asam stearat dan kapri asam/asam laurat [16]. Eutektik anorganik yang paling umum yang telah diteliti terdiri dari garam hidrat yang berbeda. Manfaat dari campuran eutektik adalah kemampuannya untuk mendapatkan sifat yang lebih diinginkan seperti titik leleh spesifik atau kapasitas penyimpanan panas yang lebih tinggi per satuan volume. Penggunaan PCM eutektik dalam sistem LHTS tidak sebaik penggunaan PCM senyawa murni. Oleh karena itu, sifat fisik termo eutektik masih menjadi bidang untuk diteliti lebih lanjut karena banyak kombinasi belum diuji dan dibuktikan.

3. Aplikasi PCM pada bangunan

Zhu dkk. [17] menyajikan hasil penelitian yang dilakukan pada PCM berkaitan dengan karakteristik dinamis dan kinerja energi dalam bangunan. Tinjauan ini membagi kemungkinan aplikasi PCM ke dalam empat kategori:

- Sistem pendinginan tanpa biaya.
- Penurunan beban puncak.
- Aplikasi PCM sebagai sistem aktif.
- Aplikasi PCM sebagai sistem pasif.

Selain itu, manfaat lain yang mungkin menarik dari PCM adalah kemampuannya untuk meningkatkan kenyamanan termal dengan meminimalkan fluktuasi suhu. Studi yang diberikan di sini sebagian besar difokuskan pada efek sistem bangunan pasif melalui integrasi bahan PCM pada bangunan.

3.1. Sistem pendinginan tanpa biaya

Sistem pendinginan tanpa biaya dimana PCM bekerja dengan menyimpan kesejukan yang diserap dari luar ruangan (misalnya pada malam hari) dan melepaskan kesejukan di dalam ruangan di siang hari. Bahan PCM juga dapat digunakan untuk menyerap panas pada siang hari dimana sumber panas berasal dari matahari, aliran udara dari sistem ventilasi atau air dalam sistem pipa, dan disimpan sebagai panas laten, untuk kemudian digunakan menghangatkan ruangan ketika malam hari.

3.2. Penurunan beban puncak

Beban puncak yang terjadi pada siang hari memberi tekanan pada jaringan listrik dan juga menyebabkan kebutuhan sistem pemanas, ventilasi dan pendingin udara dimana ukurannya menjadi lebih besar untuk beban panas atau pendinginan. Pada akhirnya, hal ini dapat menyebabkan kebutuhan akan lebih banyak fasilitas pembangkit listrik. Dengan memanfaatkan PCM dalam bangunan maka penggunaan pemanas dan atau pendingin dalam ruangan menjadi berkurang. Dengan menurunnya beban puncak permintaan listrik menjadi lebih rendah.

3.3. Aplikasi PCM sebagai sistem aktif.

Kemampuan penyimpanan panas dari PCM dapat diintegrasikan ke dalam sistem seperti misalnya sistem pompa panas matahari dan sistem pemanas lantai. Sistem seperti itu dapat digabungkan untuk mencapai pengurangan beban puncak seperti yang dijelaskan sebelumnya. Namun, jika dibuat lebih efektif maka akan dapat mencapai penghematan lebih lanjut melalui pengurangan permintaan listrik untuk sistem ventilasi dan pendinginan udara.

3.4. Aplikasi PCM sebagai sistem pasif.

Untuk aplikasi pasif, PCM diintegrasikan ke dalam konstruksi bangunan untuk meningkatkan massa termal. Ini sangat bermanfaat dalam konstruksi ringan, yang mengalami inersia termal rendah. Masalah yang dihadapi dalam bangunan adalah fluktuasi suhu yang besar di musim panas karena pemanasan berlebih yang disebabkan oleh kurangnya massa termal. Hal ini terutama terjadi di daerah beriklim dingin di mana bangunan telah dibangun sesuai dengan standar rumah pasif, sering melibatkan isolasi dalam jumlah besar untuk mengurangi beban pemanasan di musim dingin. Bahan-bahan yang digunakan sebagai PCM akan meleleh di siang hari dan membeku pada malam hari. Ini akan membantu ruangan agar tidak terlalu

panas selama siang hari di bulan-bulan hangat dan juga dapat mengurangi kebutuhan akan pemanasan di malam hari di musim dingin. Jika PCM tidak dapat sepenuhnya membeku, efektivitas sistem akan sangat berkurang. Penggunaan PCM akan lebih efektif dalam iklim dengan variasi suhu harian yang besar. Untuk area di mana pelepasan panas tidak terjadi secara alami, udara dingin harus disuplai pada malam hari untuk mengatur ulang siklus termal dari PCM.

3.5. Kenyamanan termal

Meskipun PCM menunjukkan potensi penghematan energi, faktor penting lainnya yang perlu diperhatikan adalah manfaat PCM terhadap peningkatan kenyamanan termal dalam ruangan secara keseluruhan. Lan dkk. [18] menunjukkan korelasi antara kinerja dan produktivitas pekerja dibandingkan dengan kenyamanan termal karena perubahan suhu. Seppänen dan Fisk [20] menunjukkan bahwa suhu udara yang tinggi memiliki efek negatif pada kinerja dan produktivitas. Ketika suhu meningkat hingga 20 °C, terjadi peningkatan kinerja. Namun, ketika suhu meningkat di atas 23 °C ada penurunan produktivitas. Mempertahankan suhu tetap di sekitar zona nyaman untuk waktu yang lama tanpa mengandalkan sistem ventilasi dan pengkondisian udara dimungkinkan dengan penggunaan PCM. Dengan mengaplikasikan PCM, fluktuasi suhu berkurang. Pemilihan PCM dalam hal titik leleh/titik beku yang diinginkan sehingga suhu tetap stabil di sekitar suhu kenyamanan merupakan hal yang sangat penting. Keuntungan penggunaan PCM dalam pengaturan suhu dapat dibagi dalam dua cara. Pertama, suhu akan dipertahankan lebih stabil sehingga akan dapat mengurangi ketidaknyamanan termal karena fluktuasi suhu sepanjang hari. Kedua, suhu puncak akan berkurang dan tidak mencapai suhu yang menyebabkan peningkatan ketidaknyamanan termal.

4. Integrasi bahan berubah fase untuk sistem pasif pada bangunan.

Saat digunakan dalam bangunan, PCM dapat diintegrasikan ke dalam bahan bangunan lainnya. Dengan demikian akan memungkinkan pembuatan bangunan dengan desain aslinya, tetapi dengan bahan yang memiliki kapasitas penyimpanan energi panas yang lebih besar. Meskipun ada beberapa studi yang lebih rinci tentang semua efek PCM dalam konstruksi, produk PCM komersial telah digunakan dalam beberapa proyek. Berikut ini adalah beberapa konstruksi di mana bahan PCM dapat dimasukkan secara menguntungkan.

4.1. Dinding

Aplikasi paling umum untuk menerapkan PCM ke dalam bangunan adalah dengan memasang bahan PCM pada dinding bangunan. Untuk struktur ringan yang memiliki kelembaman termal rendah, PCM dapat memberikan peningkatan kapasitas penyimpanan panas yang signifikan. PCM yang diaplikasikan pada ruang interior bangunan atau digunakan pada dinding partisi, papan dinding akan dapat menyerap dan melepaskan panas di seluruh ruangan sepanjang hari. Beberapa investigasi, baik eksperimental maupun simulasi, telah dilakukan untuk melihat bagaimana hal ini mempengaruhi temperatur dalam ruangan dan penggunaan energi secara keseluruhan. Sunliang dkk. [20] melakukan investigasi skala penuh yang dilakukan pada dinding partisi bagian dalam bangunan. Dalam studi ini, beberapa efek positif dapat dilihat ketika ruangan dengan papan dinding PCM dibandingkan dengan yang tanpa PCM. Fluktuasi suhu udara berkurang, efek panas berlebih lebih rendah dan dinding PCM terbukti melepaskan energi ketika suhu turun. Pengujian juga menunjukkan penurunan fluktuasi suhu permukaan dinding, yaitu suhu permukaan yang lebih rendah pada siang hari dan suhu permukaan yang lebih tinggi pada malam hari. Dengan demikian, kenyamanan termal akibat pengaruh radiasi dapat ditingkatkan pada siang hari [10]. Kuznik dan Virgone [21] melakukan penelitian eksperimental di ruang uji skala penuh untuk hari-hari biasa di musim dingin, musim panas dan pertengahan musim dengan papan yang mengandung PCM. Papan dinding PCM dibuat dengan menambahkan 60% mikroenkapsulasi dalam lembaran fleksibel dengan ketebalan 5 mm. PCM ditujukan untuk mengurangi efek panas berlebih, mengurangi suhu permukaan pada dinding dan meningkatkan pencampuran konveksi alami udara. Evola dkk. [22] melakukan studi kasus simulasi dari sebuah gedung kantor yang ditambahkan dengan papan PCM selama musim panas. Papan dinding terbuat dari matriks model sarang lebah dari aluminium dan diisi dengan 60% PCM mikroenkapsulasi dengan parafin sebagai bahan intinya. Simulasi ini menunjukkan bahwa bahkan jika PCM sering diaktifkan, rata-rata mereka hanya memanfaatkan 45% dari total potensi penyimpanan panas latent mereka, yang berarti bahwa keseluruhan PCM tidak akan meleleh atau mengeras dalam setiap siklus. Pemanfaatan total potensi penyimpanan panas latent dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti misalnya perpindahan panas konvektif melintasi permukaan dinding, apakah penempatannya di area ruangan yang menerima radiasi matahari langsung

dan kondisi iklim seperti cuaca mendung atau suhu ekstrem yang berada di luar suhu normal yang diharapkan. Studi ini juga membahas pentingnya mengevaluasi PCM selama periode waktu yang lebih lama, seperti beberapa bulan, untuk dapat mengevaluasi lebih baik tingkat aktivasi dan tingkat pemanfaatan total potensi penyimpanan panas laten dari PCM di bawah iklim yang diberikan. Diaconu [23] mempelajari pengaruh pola hunian dan ventilasi yang mungkin dipengaruhi oleh bahan PCM. Melalui simulasi numerik, potensi penghematan energi panas untuk pemanasan diobservasi. Jelas bahwa pola hunian dan ventilasi harus dipertimbangkan ketika mencoba memilih suhu leleh PCM yang optimal. Ascione dkk. [24] menyelidiki kemungkinan perbaikan bangunan dengan plester PCM di sisi dalam bangunan dan efeknya pada penghematan energi dan kenyamanan dalam ruangan di musim dingin. Hasil disimulasikan sambil memvariasikan perubahan suhu fasa, ketebalan papan dinding dan lokasi lapisan PCM. Suhu perubahan fasa mulai dari 26 °C hingga 29 °C diuji. Namun, manfaat yang dapat dicapai untuk penghematan energi dalam simulasi iklim di Seville dan Naples tidak lebih dari 3%, sementara Marseille dan Athena masing-masing menerima manfaat 4,1 dan 3,5%. Efek penghematan energi tertinggi dicapai di Ankara, dengan penghematan energi 7,2%. Kenyamanan selama jam sibuk meningkat sebesar 15,5% (Seville), 22,9% (Naples), 19,8% (Marseille), 15,8% (Athena) dan 20,6% (Ankara). Penelitian yang dilakukan oleh Ascione dkk. [24] juga menyoroti faktor penting lain untuk PCM. Mereka menemukan bahwa selama musim panas, periode dengan suhu lebih rendah dari suhu perubahan fase, yaitu periode di mana PCM membeku, tidak akan selalu cukup bagi PCM untuk sepenuhnya membeku. Hal yang sama juga akan terjadi selama musim dingin, di mana panas yang tersedia pada siang hari tidak akan cukup untuk sepenuhnya melelehkan PCM. Ini menunjukkan bahwa suhu perubahan fase optimal bersifat musiman, dan pelepasan total, atau absorbansi panas total, sulit diperoleh untuk PCM tunggal. Shilei et al. [16] menguji dampak PCM yang tergabung dalam papan gypsum pada kondisi iklim musim dingin di timur laut Cina. Eksperimen dilakukan pada dua ruangan serupa, satu dengan PCM dan satu tanpa PCM. Ruang PCM menunjukkan bahwa itu bisa mengurangi perpindahan panas ke udara luar dan meningkatkan kenyamanan termal. Selanjutnya, kemungkinan untuk mengurangi skala peralatan pemanas juga ditunjukkan. Sebuah proyek renovasi di selatan Lyon menggunakan papan PCM dimonitor selama periode satu tahun oleh Kuznik dkk. [25] Kamar

itu dibandingkan dengan kamar di gedung yang sama yang direnovasi tanpa PCM. Penggunaan PCM menunjukkan peningkatan kenyamanan termal penghuni karena suhu udara dan efek radiasi. Namun, PCM tampaknya tidak dapat memanfaatkan kapasitas penyimpanan panas latennya selama beberapa periode sepanjang tahun karena suhu yang berlebihan. Becker [26] menyelidiki bagaimana kinerja termal dan energi suatu bangunan akan dipengaruhi dengan menempatkan PCM di permukaan bagian dalam dinding selama kondisi musim panas. Dengan menggunakan Energy Plus dan model yang disederhanakan, ketebalan PCM yang diperlukan untuk menyimpan panas yang didapat dari radiasi matahari dan pola hunian yang terjadi pada siang hari, dan ventilasi yang dibutuhkan pada malam hari untuk melepaskan sistem, dipelajari untuk bangunan ringan, bangunan semi-ringan dan bangunan kelas berat di iklim Mediterania. Dalam konstruksi berat, PCM dapat meningkatkan kondisi termal, tetapi memiliki efek marginal pada penghematan energi. Untuk hunian ringan dan kantor dan sekolah semi-ringan, analisis menunjukkan efek positif pada kinerja termal dan energi. Efek terbesar terlihat pada bangunan kantor ringan, di mana penghematan energi hingga 57%. Namun, penelitian ini juga menunjukkan pentingnya pola hunian dan ventilasi yang diperlukan pada saat aplikasi PCM pada bangunan. Penting untuk mendapatkan validasi pada bangunan yang dihuni dalam kondisi kerja dan iklim normal.

4.2. Lantai

Area yang bersentuhan langsung dengan radiasi matahari memiliki potensi besar untuk penyimpanan energi panas. Area bangunan tempat matahari bersinar untuk sebagian besar hari seperti lantai yang diintegrasikan dengan bahan PCM akan bermanfaat sebagai tempat penyimpanan energi panas. Xu dkk. [27] melakukan simulasi kinerja termal PCM yang digunakan dalam sistem lantai pasif selama musim dingin. Kinerja pada sistem dipengaruhi oleh pilihan bahan penutup, celah udara antara PCM dan ketebalan PCM. Untuk simulasi yang dilakukan, ketebalan tidak boleh lebih dari 20 mm karena ini tidak akan meningkatkan penyimpanan panas secara signifikan.

4.3. Atap

Mengaplikasikan bahan PCM ke dalam sistem atap tampaknya tidak mendapat banyak perhatian. Hanya beberapa penelitian tentang kemungkinan efek PCM dalam sistem atap pasif telah ditemukan.

Logikanya adalah bahwa PCM yang ditempatkan di atap akan dapat menyerap energi matahari yang masuk dan energi panas dari sekitarnya untuk mengurangi fluktuasi suhu di bagian dalam ruangan. Pasupathy dan Velraj [28] meneliti efek lapisan ganda PCM untuk manajemen termal sepanjang tahun di Chennai, India. Eksperimen dilakukan dengan panel atap PCM dibandingkan dengan ruang referensi tanpa panel PCM. PCM yang digunakan adalah eutektik anorganik dari garam terhidrasi. Penelitiannya menunjukkan bahwa panel PCM di atap memperkecil fluktuasi suhu udara dalam ruangan, dan bahwa sistem seperti itu dapat diaplikasikan pada semua musim dengan ketentuan ketika panel atas memiliki suhu leleh $6-7^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi daripada suhu lingkungan di pagi hari selama bulan puncak musim panas, dan panel bagian bawah memiliki suhu leleh di dekat suhu ruangan yang disarankan. Kosny dkk. [29] menggunakan atap berventilasi alami dengan modul *photovoltaic* (PV) dan PCM yang digunakan sebagai *heat sink*. Tujuannya adalah agar PCM menyerap panas di siang hari di musim dingin dan melepaskannya di malam hari untuk mengurangi beban pemanasan. Pada musim panas PCM akan menyerap panas untuk mengurangi beban pendinginan. Eksperimen skala penuh dilakukan sepanjang tahun dari November 2009 hingga Oktober 2010 di Oak Ridge, Tennessee. Data dari hasil pengujian dibandingkan dengan atap sirap aspal konvensional. Loteng PV-PCM menunjukkan pengurangan 30% pada beban pemanasan selama musim dingin dan penurunan 55% pada beban pendinginan.

4.4. Jendela

Jendela merupakan bagian dari bangunan yang dianggap mengarah pada konsumsi energi yang lebih tinggi. Dalam iklim hangat yang didominasi oleh beban pendinginan, peningkatan panas matahari yang berlebihan menyebabkan peningkatan kebutuhan akan pendinginan. Dalam iklim dingin, sebagian besar energi keluar melalui jendela, yang menyebabkan kebutuhan pemanasan meningkat [30]. Beberapa teknologi jendela canggih seperti jendela krom elektro, kaca-e rendah, kaca dievakuasi, kaca pembersih-sendiri, membangun photovoltaics terintegrasi (BIPV) sebagai kaca surya, dll., telah dieksplorasi untuk mengatasi masalah ini. Namun, jendela dengan lapisan kaca memiliki inersia termal yang rendah dan tidak memiliki cara untuk menyimpan panas berlebih. PCM transparan yang digunakan sebagai jendela memiliki peluang yang besar untuk tujuan ini. Masalah pertama yang harus diatasi adalah keinginan untuk memiliki jendela yang cukup transparan. Sampai saat ini, hanya PCM transparan

yang telah digunakan untuk jendela PCM. Meskipun jumlah cahaya relatif tinggi untuk melewatkannya, namun jendela PCM transparan ini tidak menawarkan visibilitas yang sama seperti jendela biasa.

4.5. Beton

Menambahkan PCM langsung ke beton telah menunjukkan beberapa hasil yang menjanjikan melalui konduktivitas termal yang lebih rendah dan peningkatan massa termal pada suhu tertentu. Namun, beton PCM telah menunjukkan beberapa sifat yang tidak diinginkan seperti kekuatan yang lebih rendah, stabilitas jangka panjang yang tidak pasti dan daya tahan terhadap api yang lebih rendah [9]. Beberapa penelitian telah dilakukan pada PCM-beton dan telah menunjukkan efek positif melalui penurunan suhu dalam ruangan di iklim hangat. Menggabungkan struktur beton dengan PCM telah dicoba dengan beberapa cara berbeda. Salah satu solusi yang dipelajari adalah untuk membuat lubang di beton yang kemudian dapat diisi dengan PCM. Royon dkk. [31] menguji kemungkinan mengisi area yang sudah berlubang di lantai beton berlubang dengan PCM. Beton diisi dengan PCM parafin dengan suhu leleh $27,5^{\circ}\text{C}$. Pengujian ini menunjukkan bahwa suhu di sisi lain beton berlubang lebih rendah selama kondisi musim panas. Oleh karena itu, lantai tersebut dapat digunakan sebagai sistem termal pasif selama musim panas. Namun, lebih banyak pengujian diperlukan dengan kondisi kehidupan nyata untuk memvalidasi efek yang terjadi.

4.6. Bahan isolasi termal

Belakangan ini, penggabungan PCM ke dalam bahan isolasi termal berserat telah mendapatkan perhatian yang cukup besar. Kosny dkk. [29] melakukan analisis secara eksperimental dan numerik dari dinding bingkai kayu yang mengandung isolasi serat PCM. Rakitan dinding memiliki nilai $R\ 4,14\ (\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ dan nilai $U\ 0,241\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Untuk isolasi serat yang diisi dengan 30% berat PCM dalam kondisi musim panas, hasilnya menunjukkan pengurangan panas pada jam puncak sebesar 23-37% di Marseille dan 21-25% di Kairo dan Warsawa.

4.7. Perabotan dan peralatan dalam ruangan

Bagian yang belum diselidiki untuk penelitian ini, tetapi harus disebutkan, adalah kemungkinan menggunakan PCM dalam furnitur dan peralatan dalam ruangan lainnya. Bahan PCM memiliki kemampuan untuk menyimpan panas dalam periode di mana ada surplus, dan melepaskan panas ketika ada defisit. Akan menarik untuk

dipelajari bagaimana penggabungan PCM ke dalam komponen lain dalam bangunan selain komponen struktural dan dapat memberikan penghematan energi dan kenyamanan. PCM telah banyak dipelajari untuk aplikasi tekstil [32], menunjukkan bahwa ada kemungkinan menambahkan PCM ke berbagai bentuk bahan.

5. Efisiensi energi

Efisiensi energi adalah ukuran penting untuk mengurangi total penggunaan energi di seluruh dunia. PCM dapat menawarkan peningkatan efisiensi energi pada keseluruhan bangunan dengan sedikit atau tanpa ruang tambahan yang dibutuhkan. Dampak pada desain bangunan dapat diminimalkan melalui solusi seperti dinding yang mengandung PCM dan pelapisan PCM.

6. Persyaratan keamanan

Persyaratan keamanan adalah poin penting yang harus dipenuhi ketika bahan PCM digunakan pada bangunan. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa bahan PCM tidak boleh beracun atau mudah terbakar. Namun, bagi banyak PCM organik mudah terbakar dan kemungkinan pelepasan asap beracun selama pembakaran telah menjadi masalah. Beberapa solusi telah dibuat untuk mengatasi masalah ini, seperti mikrokapsul yang tahan terhadap api dan penambahan bahan penghambat api. Oleh karena itu, penting bagi produsen PCM untuk membuat aplikasi yang diperlukan untuk memberikan informasi yang andal tentang kinerja produk mereka. Nguyen dkk. [33] melakukan penelitiannya berkaitan dengan usaha yang telah dilakukan untuk meningkatkan daya tahan api dari PCM dengan penggunaan *retardants* untuk meningkatkan ketahanan api pada komposit PCM.

7. Simpulan

Menggabungkan material PCM ke dalam konstruksi bangunan memungkinkan penggunaan energi yang lebih dinamis. PCM memiliki kemampuan untuk penyimpanan energi panas atau dingin, dimana kelebihan panas dapat disimpan selama periode hangat dan dilepaskan selama periode dingin. Dan dapat bekerja sebaliknya, menyimpan energi dingin dan menggunakan untuk sistem pendingin di periode hangat. Manfaat dari menggunakan PCM di gedung-gedung terutama berkisar pada penurunan penggunaan energi secara keseluruhan dengan penurunan beban puncak yang diperlukan untuk pemanasan atau pendinginan dan peningkatan kenyamanan termal dengan mengurangi fluktuasi suhu.

Banyak aplikasi dari PCM, misalnya papan dinding dan ubin lantai, dapat ditambahkan ke konstruksi dengan sedikit perubahan pada cara pembangunannya. Ada berbagai macam bahan yang dapat digunakan sebagai PCM. Mengidentifikasi PCM yang sesuai untuk aplikasi spesifik dan untuk kondisi iklim spesifik adalah area yang perlu penelitian lebih lanjut. Perhitungan periode pengembalian untuk instalasi PCM juga diperlukan untuk lebih memvalidasi penggunaan teknologi PCM. Meskipun berbagai bahan tambahan telah diuji untuk meningkatkan konduktivitas termal untuk siklus absorbansi dan pelepasan yang lebih efektif, ini membutuhkan biaya penyimpanan panas laten yang lebih rendah per satuan berat dan volume, sehingga memberikan potensi penyimpanan PCM lebih sedikit.

Rendahnya daya tahan terhadap api masih menjadi masalah bagi PCM organik, meskipun solusi yang menjanjikan telah diperkenalkan. Teknologi PCM tampaknya menjanjikan, namun masih ada beberapa kendala yang perlu diatasi untuk aplikasi skala besar dari teknologi ini. Standar yang menyatakan metode pengujian dan dapat membantu mengidentifikasi PCM yang sesuai untuk berbagai iklim masih diperlukan sehingga dapat menghasilkan siklus yang tepat dan optimalisasi sistem PCM. Penelitian teknologi PCM baru juga sangat penting, misalnya kemungkinan mendapatkan PCM yang dapat disesuaikan secara dinamis dan bahkan dapat dikontrol.

Daftar Pustaka

- [1] Memon SA. Phase change materials integrated in building walls: a state of the art review. Renew Sustain Energy Rev 2014;31:870–906.
- [2] B.P. Jelle, C. Breivik, State-of-the-art building integrated photovoltaics, EnergyProcedia 20 (2012) 68–77.
- [3] T. Gao, B.P. Jelle, L.I.C. Sandberg, A. Gustavsen, Monodisperse hollow silica nanospheres for nano insulation materials: synthesis, characterization, and life cycle assessment, ACS Appl. Mater. Interfaces 5 (2013) 761–767.
- [4] R. Baetens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenpierik, S. Gryning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond, Energy Build. 42 (2010) 147–172.
- [5] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, S. Gryning, Gas-filled panels for building applications: a state-of-the-art review, Energy Build. 42 (2010) 1969–1975.
- [6] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase

- change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (2010) 615–628.
- [7] S.N. Al-Saadi, Z. Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 21 (2013) 659–673.
- [8] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review, Energy Build. 42 (2010) 1361–1368.
- [9] T.C. Ling, C.S. Poon, Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview, Construct. Build. Mater. 46 (2013) 55–62.
- [10] F. Kuznik, J. Virgone, J.J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, Energy Build. 40(2008) 148–156.
- [11] J.H. Dieckmann, Latent heat storage in concrete, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, http://www.eurosolar.org/new/pdfs/neu/Thermal/IRES2006_Dieckmann.pdf (accessed 31.10.2013).
- [12] M.K. Rathod, J. Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 18(2013) 246–258.
- [13] C. Alkan, Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage, Thermochim. Acta 451(2006) 126–130.
- [14] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, Y. He, Fatty acids as phase change materials: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 29 (2014) 482–498.
- [15] G.A. Lane, Phase change thermal storage materials, in: C. Guyer (Ed.), HandBook of Thermal Design, McGraw Hill Book Co., 1989.
- [16] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage, Energy Build. 38(2006) 708–711.
- [17] N. Zhu, Z. Ma, S. Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review, Energy Convers. Manage. 50 (2009) 3169–3181.
- [18] L. Lan, P. Wargocki, Z. Lian, Quantitative measurements of productivity loss due to thermal discomfort, Energy Build. 43 (2011) 1057–1062.
- [19] O.A. Seppänen, W.J. Fisk, Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health, ASHRAE Res. J. (February)(2006).
- [20] C. Sunliang, A. Gustavsen, S. Uvsløkk, B.P. Jelle, J. Gilbert, J. Maunuksela, The thermal performance of wall-integrated phase change material panels – hotbox experiments, in: Proceedings of the Renewable Energy Research Conference – Renewable Energy Beyond 2020, Trondheim, Norway, 7–8 June, 2010.
- [21] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental assessment of a phase change material for wall building use, Appl. Energy 86 (2009) 2038–2046.
- [22] G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella, A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, Build. Environ. 59 (2013) 517–527.
- [23] B.M. Diaconu, Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: influence of occupancy pattern and ventilation, Energy Build. 43 (2011) 101–107.
- [24] F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. de' Rossi, G.P. Vanoli, Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: and indoor comfort in the cooling season, Appl. Energy 113 (2014) 990–1007.
- [25] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard, Renew. Energy 36 (2011) 1458–1462.
- [26] R. Becker, Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials, J. Build. Phys. 37 (2014) 296–324.
- [27] X. Xu, Y. Zhang, K. Ling, H. Di, R. Yang, Modeling and simulation on thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, Energy Build. 37 (2005) 1084–1091.
- [28] A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, Energy Build. 40 (2008) 193–203.
- [29] J. Kosny, K. Biswas, W. Miller, S. Kriner, Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink, Sol. Energy 86 (2012) 2504–2514.
- [30] K.A.R. Ismail, C.T. Salinas, J.R. Henriquez, Comparison between PCM filled glass

- windows and absorbing gas filled windows,
Energy Build. 40 (2008) 710–719.
- [31] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings, Energy Build. 63 (2013) 29–35.
- [32] N. Sarier, E. Onder, Organic phase change materials and their textile applications: an overview, Thermochim. Acta 540 (2012) 7–60.
- [33] Q. Nguyen, T. Ngo, P. Mendis, A review on fire protection for phase change materials in building applications, in: Samali, Attard, Song (Eds.), From Materials to Structures: Advancement Through Innovation, Taylor & Francis Group, 2013.