



Penggunaan material berubah fasa sebagai penyimpan energi termal pada bangunan gedung

Hamdani Umar*

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Banda Aceh, 2311, Indonesia.

*Email: hamdani@unsyiah.ac.id

Abstrak

Konsumsi energi sektor bangunan dunia mencapai 30% dari konsumsi energi secara keseluruhan dan menyumbang sepertiga emisi gas rumah kaca di seluruh dunia. Penyimpanan energi termal adalah teknik sederhana dan efektif yang diaplikasikan pada bangunan untuk meningkatkan efisiensi energi bangunan dan diharapkan mampu mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan penggunaan energi. Penyimpanan termal dengan memanfaatkan material berubah fasa (*phase change material*, PCM) adalah teknik yang paling menjanjikan karena kemampuan penyimpanan energi yang tinggi dan perubahan temperatur yang kecil. Kombinasi bahan bangunan dan PCM adalah cara yang efisien untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan energi termal komponen bangunan untuk tujuan penyimpanan energi termal langsung di bangunan gedung. Pada kajian ini diberikan hasil pengujian pemanfaatan lilin lebah sebagai material berubah fasa pada beton bangunan. Hasil pengujian beton yang dilengkapi dengan lilin lebah sebagai PCM mengalami penurunan kuat beton, tetapi di sisi lain mampu menyerap dan menyimpan energi panas. Hasil analisis aplikasi pada gedung bangunan mampu menurunkan beban pendingin dalam ruangan.

Kata kunci : Material berubah fasa, energi, beton, bangunan, efisiensi

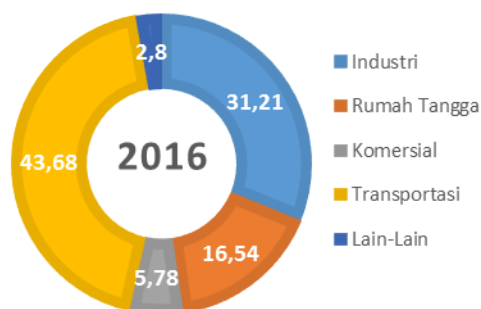
Use of phase changed material as a thermal energy storage in buildings

Abstrack

The energy consumption of the world building sector reaches 30% of overall energy consumption and accounts for one third of greenhouse gas emissions worldwide. Thermal energy storage is a simple and effective technique to be applied to buildings to improve building energy efficiency, and is expected to reduce the environmental impacts associated with energy use. Thermal storage by utilizing phase change material (PCM) is the most promising technique because of its high energy storage capability and small temperature changes. The combination of building materials and PCM is an efficient way to increase the thermal energy storage capacity of building components for the purpose of storing thermal energy directly in buildings. In this study the results of testing the use of beeswax as a phase change material in building concrete are given. The test results of concrete equipped with beeswax as PCM decreased the strength of the concrete but on the other hand it was able to absorb and store heat energy. The results of application analysis in buildings are able to reduce indoor cooling loads.

Keywords: Phase change material, energy, concrete, building, efficiency

1. Pendahuluan



Gambar 1. Peningkatan konsumsi energi Indonesia tahun 2007-2016.

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa pada tahun 2016 pangsa terbesar konsumsi energi final adalah sektor transportasi (43,68%) diikuti oleh industri (31,21%), rumah tangga (16,54%), komersial (5,78%), dan lainnya (2,8%). Selama kurun waktu 2007-2016, sektor transportasi mengalami pertumbuhan terbesar yang mencapai 14,94%, diikuti sektor rumah tangga (2,16%), dan sektor komersial (1,53%)[1].

Dengan meningkatnya perekonomian dan penduduk diproyeksikan penggunaan energi final di sektor rumah tangga, sektor komersial, dan sektor lainnya (pertanian, konstruksi dan pertambangan) akan terus bertambah. Peranan sektor komersial terhadap total kebutuhan energi final diperkirakan

akan meningkat dari 5,78% pada tahun 2016 menjadi menjadi 6,4% pada tahun 2050.

Tingginya peningkatan kebutuhan energi final perlu diantisipasi dengan menerapkan upaya konservasi energi di sisi hulu yang didukung dengan penetapan kebijakan yang tepat dan dapat dilaksanakan. Pemerintah menargetkan pengurangan intensitas energi 1% per tahun sampai tahun 2025 dengan cara melakukan efisiensi energi di sektor perekonomian dan mengurangi konsumsi energi final (*TFC-final consumption*) sebesar 17% di tahun 2025[2].

Sektor komersial terdiri atas perdagangan, hotel, restoran, keuangan, badan pemerintah, sekolah, rumah sakit, komunikasi, dan lainnya. Pertumbuhan konsumsi energi di sektor komersial pada periode 2010-2015 memiliki rata-rata pertumbuhan sebesar 4% per tahun. Pada tahun 2015, sektor ini mengkonsumsi energi sebesar 34,1 Juta SBM, atau sekitar 3% dari total konsumsi energi final. Sebagian besar (70.9%) dikonsumsi dalam bentuk listrik yang diikuti oleh diesel oil, biomasa, gas kota, liquid petroleum gas (LPG), dan minyak tanah [3].

Bangunan umumnya dibangun dari bahan bangunan konvensional berupa: batu-bata, beton rangka baja, beton cor, plaster semen dan insulasi untuk mengurangi beban AC di dalam gedung. Penggunaan material perubahan fase, sebagai bahan yang mampu menyimpan energi laten adalah cara yang efisien untuk mengurangi konsumsi energi pada bangunan [4].

Energi panas dapat disimpan dan diambil dalam bentuk perubahan energi dalam dari bahan sebagai panas sensibel, panas laten, dan termo-kimia atau kombinasi di antaranya. Pada sistem penyimpanan panas sensibel, energi disimpan dengan menaikkan suhu bahan. Sistem ini memanfaatkan kapasitas panas dan perubahan suhu bahan selama proses penyerapan dan pelepasan panas. Jumlah energi yang disimpan oleh sistem tergantung pada panas spesifik dari media, perubahan suhu dan massa media yang digunakan.

Penyimpanan panas laten bekerja berdasarkan penyerapan panas atau melepaskan ketika bahan penyimpanan mengalami perubahan fasa dari padat menjadi cair atau dari cair ke gas atau sebaliknya [5]. Dalam sistem termo-kimia, energi yang diserap atau dilepaskan berlangsung selama proses perubahan ikatan molekul akibat reaksi kimia dan proses yang berlangsung seluruhnya reversibel.

Di antara teknik ini, penyimpanan panas laten memanfaatkan PCM telah menarik para peneliti karena keunggulannya dalam menyimpan energi yang tinggi dan perubahan suhu yang kecil. Penyimpanan panas laten dapat dicapai melalui fase transformasi padat-padat, padat-cair, padat-gas dan gas-cair. Namun, sistem padat-cair, lebih unggul secara ekonomi menarik untuk digunakan dalam sistem penyimpanan energi termal.

Kombinasi bahan bangunan dan PCM adalah cara yang efisien untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan energi termal pada komponen bangunan. Teknik penggabungan dengan enkapsulasi-PCM bentuk komposit adalah metode yang paling sederhana, praktis, ekonomis dan telah menarik minat banyak peneliti dalam dekade terakhir[6]. Akan tetapi, beberapa permasalahan masih perlu diselesaikan dalam pengembangan PCM komposit yang memiliki bentuk stabil antara lain penggunaan eutetic-PCM untuk pengembangan komposit belum memberikan hasil yang baik dan terbatasnya informasi sifat termofisik dari PCM [7,8]. Banyak PCM yang diusulkan memiliki temperatur lebur tidak pada temperatur kenyamanan termal (16-26°C) [9,10]. Beberapa peneliti menggunakan material pendukung pembuatan komposit adalah material yang tidak umum digunakan sebagai material bangunan [11,12].

Kajian penelitian ini adalah pemanfaatan lilin lebah sebagai material berubah fasa pada beton bangunan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Material Penyimpan Energi Termal

Penyimpan energi panas dapat diklasifikasikan sebagai penyimpan energi dalam bentuk panas sensibel, panas laten, dan gabungan panas sensibel dengan panas laten. Pada sistem penyimpanan panas sensibel, energi disimpan akibat kenaikan temperatur dari material. Sistem memanfaatkan kapasitas panas dan perubahan temperatur material selama proses penyerapan dan pelepasan panas.

Penyimpanan panas laten memanfaatkan panas laten yang terdapat pada material untuk menyimpan energi panas. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap selama perubahan fasa pada material tersebut dari satu fasa ke fasa yang lainnya. Ada dua jenis panas laten yang diketahui yaitu panas laten peleburan dan panas laten penguapan. Panas laten peleburan adalah jumlah panas yang diserap ketika material berubah dari fasa padat ke fasa cair atau sebaliknya, kemudian panas laten penguapan adalah jumlah energi panas yang diserap ketika material berubah dari fasa cair ke fasa uap atau sebaliknya.

2.2 Kriteria Pemilihan Material Berubah Fasa

Transmitansi termal dari struktur bangunan memainkan peran penting untuk peningkatan terjadinya perpindahan panas yang baik. Saat transmitansi termal menurun, struktur bangunan menjadi lebih resisten terhadap aliran panas sehingga kehilangan panas dan penyerapan panas melalui struktur bangunan menurun. Oleh karena itu, transmitansi termal memiliki efek signifikan pada pengurangan beban termal bangunan serta menjaga bangunan pada kestabilan termal. Selain transmitansi termal, penyimpanan panas di struktur bangunan

memiliki arti penting dalam rangka meningkatkan inersia termal bangunan.

Keunggulan utama dari PCM adalah untuk menjaga lingkungannya pada kondisi termal stabil dengan menyimpan lebih banyak panas per satuan volume dari bahan konvensional lain. Ketika suhu meningkatkan ikatan kimia antara molekul pecah dan bahan mencair dan berubah dari padat menjadi cair, perubahan fasa dari padat ke cair material menyerap panas, sebaliknya, ketika suhu turun di bawah titik leleh, material membeku dan berubah dari fasa cair ke padat, selama perubahan fasa panas yang dilepaskan.

Dalam rangka mendapatkan kinerja terbaik pemakaian PCM pada struktur bangunan, beberapa sifat fisik, kinetik, dan kimia harus dimiliki oleh PCM adalah [13,14];

Sifat termal :

- temperatur lebur sesuai dengan suhu ruangan yang diinginkan
- entalpi panas laten yang tinggi per volume untuk menyerap panas sebanyak mungkin.
- kapasitas panas spesifik yang tinggi untuk menyimpan panas sensibel tambahan
- konduktivitas termal tinggi di fasa padat dan cair untuk meningkatkan perpindahan panas saat penyerapan panas selama mencair dan ekstraksi panas pada pembekuan.

Sifat fisik:

- perubahan volume yang kecil selama perubahan fasa untuk interaksi baik dengan bahan bangunan
- Tidak ada fasa pemisahan

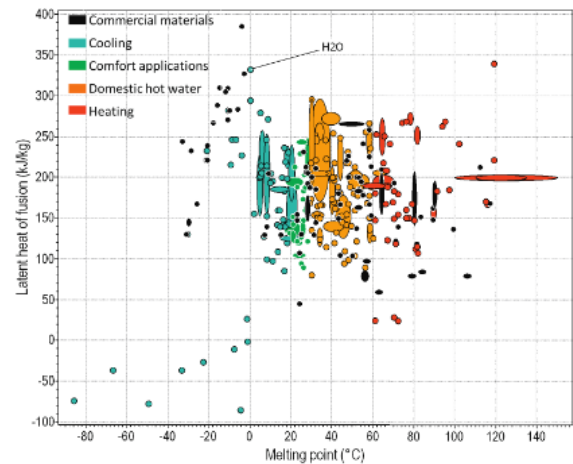
Sifat kinetik dan kimia:

- tidak ada pendinginan lanjut
- tidak ada degradasi setelah siklus pembekuan dan pelelehan
- tidak beracun, tidak korosif dan tidak mudah terbakar

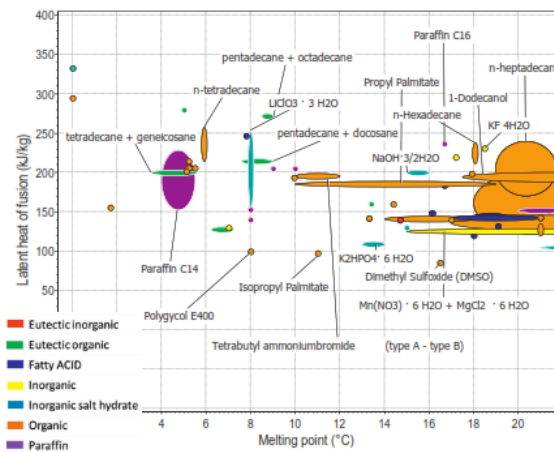
Cabeza dkk [15] melakukan tabulasi berbagai material berubah fasa yang dapat digunakan pada bangunan baik sistem pasif maupun aktif, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.

Barrenechea, dkk [16], melakukan pendataan terbaru material berubah fasa yang dapat digunakan pada bangunan, yaitu: untuk aplikasi pendinginan bangunan menggunakan material berubah fasa yang memiliki temperatur leleh di bawah 21 °C, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.

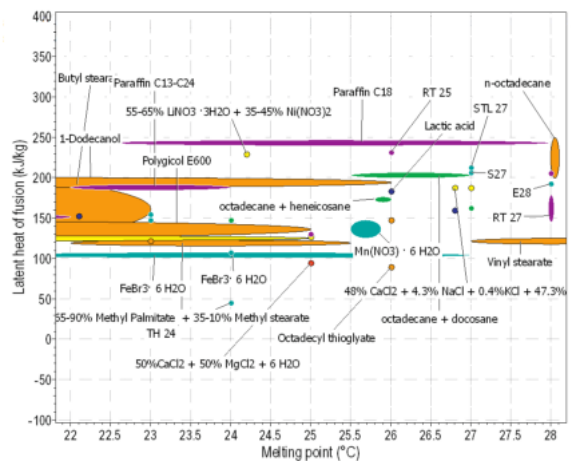
Sedangkan untuk PCM dengan temperatur leleh 20 °C sampai 30 °C untuk aplikasi pada bangunan menggunakan sistem pasif ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 2. Material berubah fasa untuk pemakaian pada bangunan(15)



Gambar 3. PCM untuk aplikasi pendinginan (temperatur leleh 0-21°C) (16)



Gambar 4. PCM untuk aplikasi pendinginan (temperatur leleh 20°C-30°C) [16]

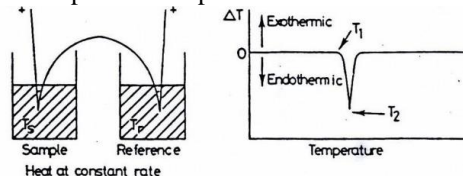
Sebagai bahan penyimpanan panas dalam bangunan, PCM harus memiliki karakteristik termofisik, kinetik, kimia, teknis, dan ekonomi tertentu yang diinginkan, tetapi harus dicatat bahwa hampir tidak ada PCM yang dapat memenuhi semua kriteria yang diinginkan[17].

Dalam aplikasi praktis, sifat termo-fisik seperti suhu leleh, panas laten fusi, konduktivitas termal, dan densitas padat dan cair adalah sebelum faktor yang sangat penting dipertimbangkan. Pengukuran sifat-sifat tambahan perlu dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat yang kurang sesuai dari bahan yang dipilih, misalnya, adanya sifat nukleasi untuk menghindari pendinginan super dan konduktivitas termal yang rendah yang membutuhkan peralatan tambahan seperti sirip atau grafit untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM.

2.3 Pengujian Sifat Termofisik Material Berubah Fasa.

2.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

DSC bekerja berdasarkan temperatur dari *sample* dibandingkan dengan temperatur material referensi yang memiliki sifat inert. Temperatur *sample* dan referensi akan sama apabila tidak terjadi perubahan, tetapi pada saat terjadinya beberapa peristiwa termal, seperti pelelehan, dekomposisi atau perubahan struktur kristal pada *sample*, temperatur dari *sample* dapat berada di bawah (apabila perubahannya bersifat endotermik) ataupun di atas (apabila perubahannya bersifat eksotermik) temperatur referen. Penggunaan *sample* dan referen secara bersamaan diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Metode pengukuran dengan DSC (18)

Sampel dan referen ditempatkan bersebelahan dalam *heating block* yang dipanaskan ataupun didinginkan pada laju konstan. Perubahan temperatur diukur menggunakan termokopel. Pada saat sampel dan referen berada pada temperatur yang sama, beda temperatur sampel dan referensi akan sama dengan nol. Pada saat suatu peristiwa termal berlangsung pada sampel maka akan terjadi perbedaan temperatur sebesar ΔT .

Ukuran sampel biasanya < 15 miligram, sehingga mengurangi timbulnya gradien termal dalam sampel yang dapat mengurangi sensitivitas dan akurasi. Laju pemanasan dan pendinginan biasanya berada pada range 1- 50 $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Pada penggunaan laju yang lebih lambat, sensitivitas akan berkurang karena ΔT bagi peristiwa termal tertentu akan menurun dengan menurunnya laju pemanasan [18].

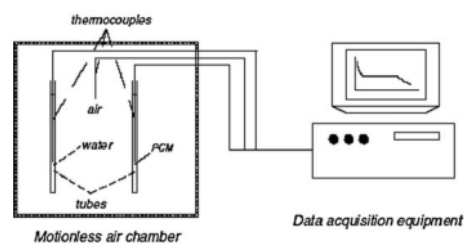
2.3.2 T-History Method (THM)

Keterbatasan DSC secara akurat menentukan sifat termofisik PCM, dengan penggunaan massa sampel yang optimal hanya 5 mg memperlihatkan tidak mewakili massa dalam kisaran kilogram yang

digunakan dalam aplikasi praktis. Disisi lain *Supercooling-subcooling* dan sifat mencair yang bergantung pada jumlah PCM dapat bervariasi secara substansial dengan perubahan massa sampel PCM dari mg ke kilogram.

T-History Methode pertama kali dikembangkan oleh Yinping et al. pada tahun 1999 [19]. Metode ini memungkinkan untuk mendapatkan titik lebur, panas laten, tingkat *subcooling*, konduktivitas termal dan panas spesifik beberapa sampel PCM secara bersamaan.

Jika tabung yang berisi cairan PCM memiliki temperatur yang seragam dan sama dengan T_0 ($T_0 > T_m$, T_m adalah temperatur peleburan pada PCM), selanjutnya diletakkan pada temperatur lingkungan $T_{\infty,a}$ (tergantung dengan waktu) sehingga akan membentuk kurva temperatur terhadap waktu pada PCM yang disebut dengan kurva T-History. Gambar 6, menunjukkan rangkaian peralatan pengujian T-History



Gambar 6. Rangkaian peralatan pengujian T-History

2.4 Pemakaian Material Berubah Fasa pada Bangunan.

2.4.1 Metode Penggabungan PCM

PCM dapat dimanfaatkan baik secara pasif maupun aktif dalam bangunan. Dalam kedua kasus PCM dimasukkan ke dalam amplop bangunan. Dalam sistem pasif energi matahari pada siang hari dan kesejukan pada malam hari disimpan ke dalam selubung bangunan, yang melibatkan PCM. Hal ini akan mengurangi dan menggeser puncak pemanasan dan beban pendinginan puncak. Dalam sistem aktif listrik didorong pemanasan atau pendinginan sistem yang digunakan untuk menyimpan panas dan kesejukan kepada PCM dimasukkan selubung bangunan pada saat *off-peak*, dengan harga listrik yang relatif rendah. Panas dan kesejukan yang disimpan dapat digunakan selama masa puncaknya ketika harga listrik yang tinggi. Manfaat ekonomi dapat dicapai dengan aplikasi ini. Dalam hal ini hanya sistem pasif yang diselidiki. PCM dimasukkan ke dalam bahan bangunan dengan metode yang berbeda tapi yang paling menjanjikan dengan cara penggabungan langsung, perendaman dan enkapsulasi

2.4.2 Penggabungan Langsung

Dalam penggabungan langsung, PCM dalam bentuk cair atau bubuk dicampur dengan bahan kontruksi selama tahap produksi. Hal ini membuat proses lebih ekonomis, jenis ini seperti *wallboards gypsum* dan beton [20,21].

Feldman et al. meneliti sifat fisiko-mekanik laboratorium diproduksi papan gipsium dengan 21-22% dari butil Jenis stearat PCM dengan metode penggabungan langsung. Mereka telah menemukan bahwa papan gipsium ini memiliki 10 kali dari kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar dari papan gypsum polos dengan perubahan diabaikan dari sifat utamanya[22].

Bentz et.al meneliti tentang produksi sampel beton dengan menggunakan semen sebagai bahan matriks untuk PCM. Mereka menghasilkan sampel beton di dua metode; pertama dengan mencampur semen dan pra PCM diserap agregat ringan dan kedua dengan mencampur semen dan PCM saja[23].

Zhang et al. memproduksi beton penyimpanan energi panas dengan menggunakan agregat berpori, yang diserap jenis butil stearat PCM. Agregat ini dicampur dengan semen dan bahan baku lainnya untuk menghasilkan beton penyimpanan energi panas. Mereka telah menemukan bahwa beton penyimpanan energi panas dapat diterapkan pada bangunan untuk konservasi energi. Kelemahan dari penggabungan langsung adalah bahwa PCM bisa langsung berinteraksi dengan bahan bangunan menyebabkan degradasi sifat utama dari bahan tersebut. Selanjutnya, PCM dapat bocor atau mengalir keluar dari bahan dan mencemari lingkungan *indoor*[24].

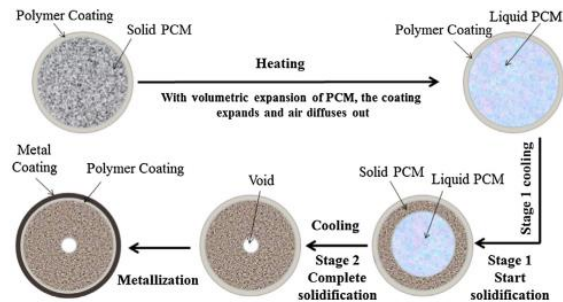
2.4.3 Enkapsulasi

Metode enkapsulasi dikembangkan dengan tujuan mengatasi kekurangan, seperti kebocoran dan efek samping terhadap sifat material PCM yang timbul dari proses penggabungan dan pencelupan langsung. Dengan metode ini, PCM digabungkan dengan bahan bangunan setelah PCM dikapsulkan dalam wadah, sehingga tidak terjadi kontak langsung dengan bahan bangunan. Hal ini untuk mencegah degradasi bahan bangunan yang disebabkan oleh PCM. Ada dua cara metode enkapsulasi yaitu makro-encapsulasi dan mikro-encapsulasi.

Metode makro-encapsulasi, PCM yang dikemas dalam wadah khusus seperti tabung atau bola kemudian dimasukkan ke dalam bahan bangunan. Enkapsulasi mencegah PCM dari bocor luar dan dari kontak langsung dengan bahan bangunan. Ada tiga faktor utama dalam enkapsulasi PCM adalah[25]:

- Bagaimana untuk mengakomodasi ekspansi volumetrik PCM pada saat mencair.
- Tekanan yang timbul akibat karena ekspansi udara pada suhu yang tinggi dan selama siklus perubahan fasa padat-cair atau sebaliknya.
- Reaksi dari PCM cair dengan bahan enkapsulasi.

Alam[25], mengusulkan metode makro-encapsulasi PCM sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 7.



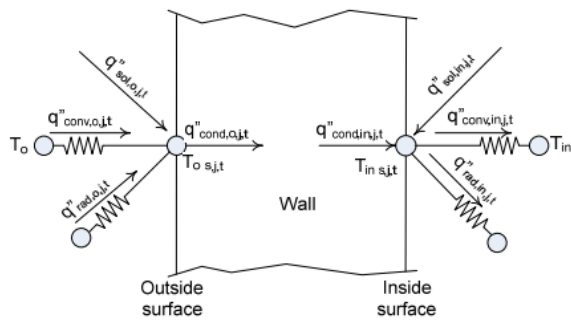
Gambar 7. Model enkapsulasi PCM

Sebuah lapisan selektif permeabel yang memungkinkan udara panas berdifusi keluar tapi tidak PCM cair akan mengatasi masalah peningkatan tekanan udara akibat perubahan volume kapsul pada siklus pemanasan. Pada saat PCM membeku dari luar-dalam (selama proses pendinginan) maka akan terbentuknya lapisan lapisan padat yang mampu mencegah peningkatan tekanan udara. Sebuah lapisan fleksibel akan mengakomodasi ekspansi volumetrik besar dari PCM pada saat proses peleburan, lapisan polimer yang fleksibel dan permeabel dapat digunakan untuk mengatasi kebocoran dan perubahan volumetrik yang besar.

2.5 Analisis Pemakaian Energi pada Bangunan

Pemodelan PCM sangat rumit karena kompleksitas dari fasa transisi. Penyimpanan dan pelepasan panas laten dan perubahan sifat termofisik material bahan selama perubahan fasa, serta tidak konstannya suhu pada saat perubahan fasa memberikan kontribusi terhadap kompleksitas ini. Ada berbagai program simulasi termal dapat model PCM. Beberapa dari mereka memiliki modul khusus yang dirancang untuk tujuan pemodelan PCM.

Energi Plus perangkat lunak analisis energi dan simulasi termal pada bangunan yang menghitung kebutuhan energi pada proses pemanasan dan pendinginan bangunan yang diperlukan untuk mempertahankan kondisi termal tertentu. Sebuah representasi grafis dari keseimbangan panas untuk bagian dinding bangunan sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skema perpindahan panas pada komposit dinding bangunan

Keseimbangan panas pada dinding dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$q''_{cond,o,j,t} = q''_{sol,o,j,t} + q''_{conv,o,j,t} + q''_{rad,o,j,t} \quad (1)$$

dimana,

$q''_{cond,o,j,t}$ = Fluk panas konduksi menuju dinding (W/m^2)

$q''_{sol,o,j,t}$ = Fluk panas energi yang diserap (W/m^2)

$q''_{conv,o,j,t}$ = Fluk panas konveksi (W/m^2)

$q''_{rad,o,j,t}$ = Fluk panas radiasi termal masuk (W/m^2).

Penyelesaian permasalahan perubahan fasa memiliki tingkatan kesulitan yang tinggi karena adanya perubahan fasa padat dan cair yang terjadi secara bersamaan, perubahan fasa antar-muka padat-cair terus bergerak dan posisinya tidak diketahui. Persamaan energi yang dibutuhkan untuk ditulis secara terpisah untuk kedua fasa dan suhu mereka harus dibarengi di fasa antar-muka. Untuk itu diperlukan persamaan untuk menentukan lokasi fasa antar-muka. Metode entalpi adalah pendekatan yang mengatasi kesulitan-kesulitan ini. Metode entalpi pada persamaan energi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} \quad (2)$$

atau dalam bentuk

$$k \left(i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} \quad (3)$$

Dimana : k = konduktivitas termal bahan,

T = Temperatur,

ρ = densitas bahan,

$\partial H(T)/\partial t$ = perubahan entalpi terhadap waktu.

2.6 Pemanfaatan Lilin Lebah sebagai Material Penyimpan Termal Pada Beton

Benda uji yang digunakan adalah kubus beton dengan ukuran 15x15x15 cm. Jumlah total kubus 60 buah, masing-masing 15 buah untuk kubus beton normal, 15 buah untuk kubus beton dengan bahan campuran dengan *beeswax*, kemudian benda uji tersebut dipanaskan dalam dapur dengan temperatur

yang bervariasi, yaitu 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Campuran adukan beton dengan menggunakan SK.SNI.T-15-1990-03

Perencanaan campuran beton dimaksudkan untuk mengetahui komposisi atau proporsi bahan-bahan penyusun beton. Proporsi bahan-bahan penyusun beton ini ditentukan melalui sebuah perancangan beton (*mix design*). Hal ini dilakukan agar proporsi campuran dapat memenuhi syarat teknis secara ekonomis. Dalam menentukan proporsi campuran dalam penelitian ini digunakan metode Departemen Pekerjaan Umum yang berdasarkan pada SK SNI T-15-1990-03.

Metode pencampuran beton yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan SK.SNI.T-15-1990-03. Adapun perencanaan kuat tekan beton yang direncanakan yaitu 40 Mpa.

2.7 Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian sifat mekanik beton-PCM yang telah disiapkan berupa pengujian kuat tekan. Pengujian kuat tekan dilakukan pada enam puluh spesimen beton-PCM bentuk kubus ukuran 150x150x150 mm. Spesimen disiapkan dengan umur beton-PCM 7 hari dan 28 hari. Uji kuat tekan juga dilakukan pada suhu spesimen di sekitar suhu peleburan PCM 45 °C.

2.8 Pengujian Termal

Kemampuan beton-PCM dalam menyerap panas ditentukan dengan mengukur temperatur udara dalam ruang uji. Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan termokopel yang dihubungkan secara langsung dengan data akusisi. Pengujian dilakukan dengan memanaskan sampel uji selama 2 (dua) jam, kemudian didinginkan secara almhiah sampai temperatur sampel mencapai temperatur lingkungan.

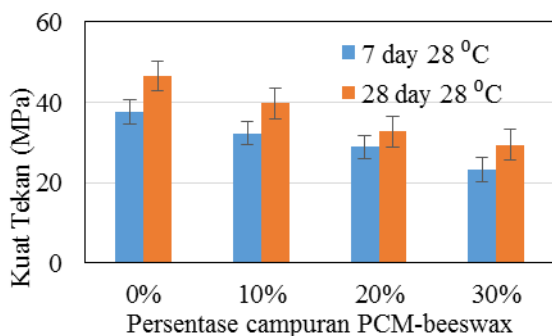
Perangkat uji kinerja termal beton-PCM dilakukan dalam ruangan yang dirancang sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 9. Sampel beton PCM berukuran 200 mm x 200 mm x 50 mm, diletakkan pada bagian atas ruang uji berukuran 200 mm x 200 mm x 200 mm, dengan dinding terbuat dari kayu. Untuk sumber panas digunakan lampu daya 250 W, ditempatkan pada jarak 320 mm diatas sampel. Untuk menjaga suhu yang seragam dan stabil digunakan penutup berongga dari bahan PVC yang dilapisi dengan kertas transparan sehingga sumber panas dari lampu dapat mencapai sampel.

3. Hasil dan pembahasan

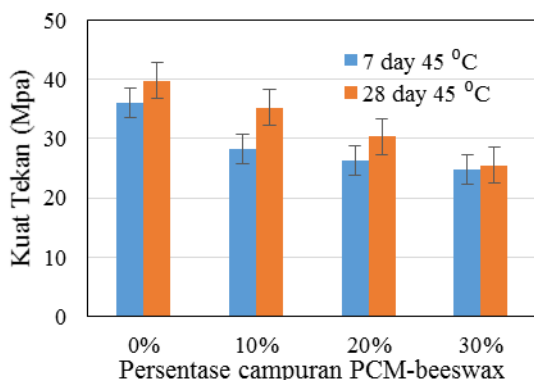
3.1 Hasil Pengujian Sifat Mekanik Beton-PCM

Penyiapan beton didasarkan pada Standar Nasional Indonesia (SNI), untuk analisis abrasive agregat halus dan kasar berdasarkan (SNI 03-1968-1990) atau ASTM C.127-1993, dan desain campuran beton berdasarkan SNI T-15-1990-03. Semen yang digunakan adalah semen Portland kualitas terbaik, agregat kasar dan agregat halus yang berkualitas baik.

Dari Gambar 11 dan 12 terlihat bahwa penambahan PCM pada beton mengakibatkan penurunan nilai kuat tekan beton. Hal ini karena PCM yang digunakan bukanlah material yang memiliki efek meningkatkan kekuatan beton. Penurunan kekuatan tekan terus terjadi dengan meningkatnya campuran PCM dalam beton, serta dalam peninjauan usia PCM-beton, sedangkan pengaruh umur dan temperatur sampel terhadap penurunan kuat tekan sangat nyata, dimana penurunan kuat tekan mencapai 21,76% dibandingkan beton tanpa PCM untuk spesimen 7 hari.



Gambar 11. Kuat tekan beton-PCM beeswax pada temperature 28 °C

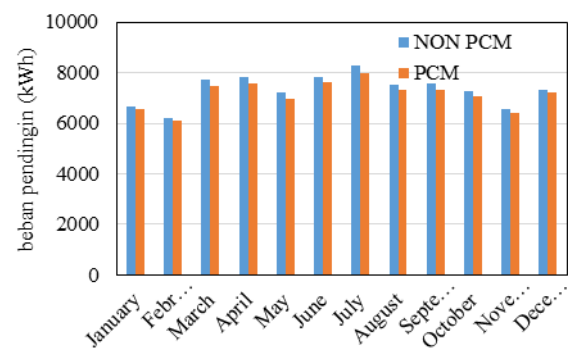
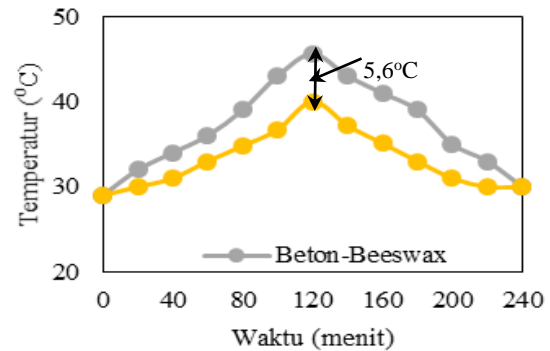


Gambar 12. Kuat tekan beton-PCM beeswax pada temperature 45 °C

3.2 Hasil Pengujian Penyerapan Panas Beton-PCM

Hasil pengujian kemampuan komposit PCM menyerap panas sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 13. Pengujian ini menggunakan sampel berukuran 200mm x 200mm x 20mm. Sampel yang

digunakan terdiri dari beton normal (tanpa PCM), dan beton-30% beeswax.

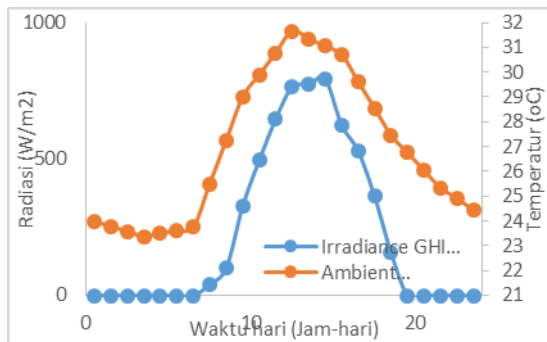


Gambar 13. Grafik perubahan temperatur sampel beton beeswax

Dari gambar terlihat, temperatur maksimum permukaan dalam beton normal mencapai 47,2°C dan temperatur maksimum udara dalam ruang uji mencapai 41,2°C, diperoleh beda temperatur 6,0°C. Hasil pengujian diperoleh temperatur maksimum permukaan dalam beton lilin lebah 45,6°C dan temperatur maksimum udara dalam ruang uji mencapai 40,0°C maka diperoleh beda temperatur 5,6°C. Berdasarkan hasil pengujian tersebut terlihat beton-lamak sapi lebih baik dalam menyerap panas. Hal ini disebabkan energi panas yang dihasilkan oleh lampu telah mencapai temperatur leleh dari lemak sapi.

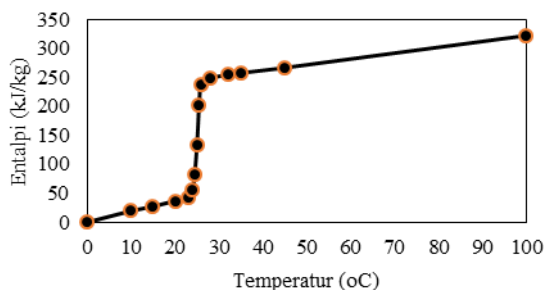
3.3 Hasil Analisis Energi Bangunan

Simulasi dilakukan dengan menggunakan data iklim kota Banda Aceh, yang meliputi data radiasi matahari, temperatur udara luar, kelembaban relative (RH). Gambar 14 memperlihatkan data radiasi matahari dan temperatur rata-rata setiap jam pada bulan April. Dari gambar terlihat bahwa 1067 W/m² dan temperatur rata-rata maksimum adalah 29,6°C. Berdasarkan data tersebut, simulasi akan dilakukan pada bulan maret selama 30 hari.



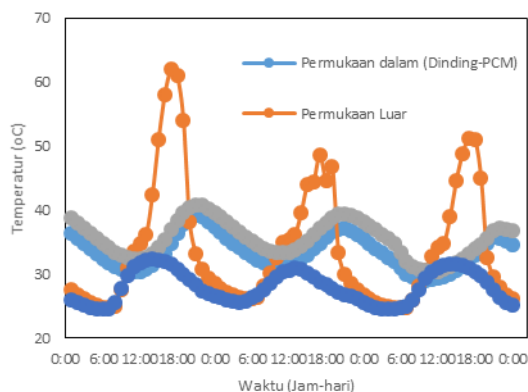
Gambar 14. Data iklim kota Banda Aceh bulan April

Simulasi dilakukan dengan menggunakan EnergyPlus yang dilengkapi dengan aplikasi penyelesaian persoalan material berubah fasa. Pada simulasi ini digunakan material berubah fasa dengan data perubahan entalpi terhadap perubahan temperatur sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 15.



Gambar 15. Kurva entalpi-temperatur untuk PCM komposit bangunan

Hasil perhitungan temperatur permukaan dinding PCM dan dinding tanpa PCM pada setiap jam diberikan dalam Gambar 16.

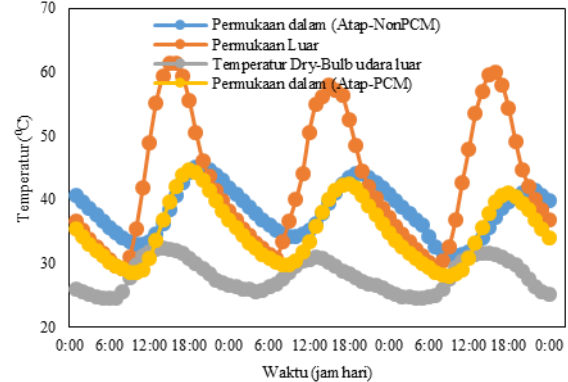


Gambar 16. Hasil perhitungan temperatur dinding pada setiap jam

Perhitungan dilakukan untuk tanggal 18-20 April. Dari gambar terlihat, temperatur permukaan dinding PCM, mulai pukul 10.00 pagi PCM menyerap panas dan mencapai temperatur maksimumnya pada malam hari dan kemudian dilepaskan kembali sampai dengan pagi besok hari. Hal yang sama juga terjadi pada dinding tanpa PCM.

Akibat adanya sifat PCM yang mengalami perubahan fasa selama penyerapan panas pada temperatur lelehnya, maka PCM mampu menghambat kenaikan temperatur permukaan dinding.

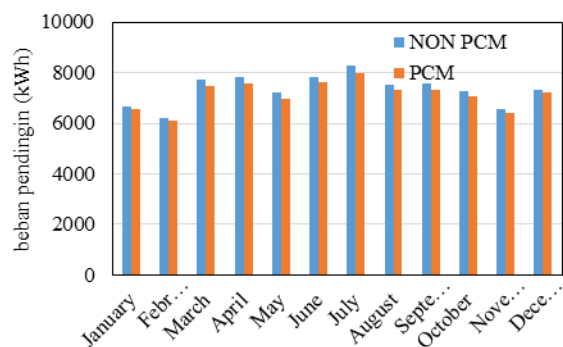
Hasil perhitungan temperatur permukaan dalam atap yang dilengkapi dengan PCM dan atap tanpa PCM pada setiap jam diberikan dalam Gambar 17.



Gambar 17. Hasil perhituganan temperatur permukaan dalam atap setiap jam

Perhitungan dilakukan untuk tanggal 18-20 April. Dari gambar terlihat, temperatur permukaan atap PCM, mulai tanggal 18-20 April berada dibawah temperatur atap tanpa PCM, hal ini PCM berfungsi dalam menyerap panas yang berasal dari sinar matahari. Dari gambar terlihat mulai pukul 10.00 pagi PCM menyerap panas dan mencapai temperatur maksimumnya pada pukul 18.00 sore dan kemudian panas tersebut dilepaskan kembali sampai dengan pagi besok hari. Hal yang sama juga terjadi pada atap tanpa PCM. Akibat adanya sifat PCM yang mengalami perubahan fasa selama penyerapan panas pada temperatur lelehnya, maka PCM mampu menghambat kenaikan temperatur permukaan atap.

Hasil simulasi energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan suhu ruangan dalam kisaran 24-28 °C, ditunjukkan pada Gambar 18.

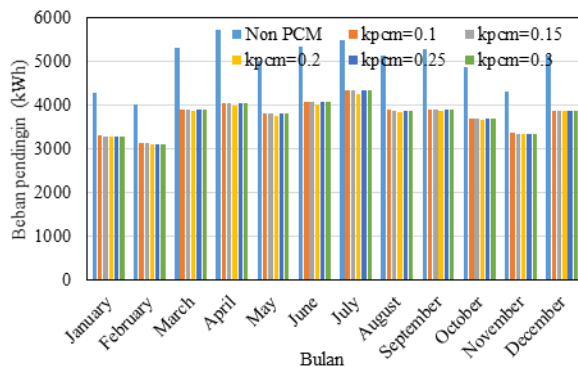


Gambar 18. Hasil perhitungan beban pending bangunan

Konsumsi energi terbesar terjadi pada bulan Juli, baik untuk bangunan tanpa PCM dan bangunan

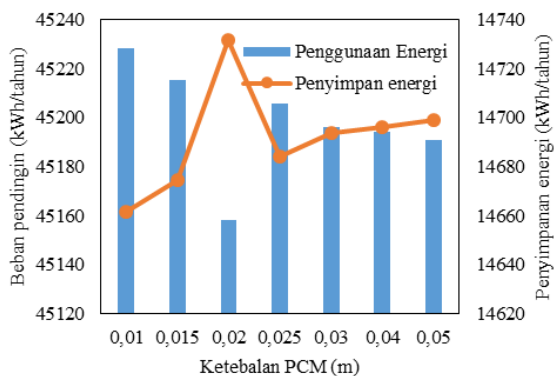
dengan PCM. Untuk mendapatkan hasil yang optimal penggunaan PCM pada bangunan, pada kajian ini dilakukan analisis pengaruh beberapa variabel terhadap beban pendingin. Adapun variabel tersebut adalah konduktivitas termal PCM (k_{PCM}), ketebalan PCM (x_{PCM}), dan temperatur dalam ruangan (T_{room}). Simulasi dilakukan untuk iklim kota Banda Aceh.

Hasil simulasi efek konduktivitas termal PCM diberikan pada Gambar 19. Konsumsi energi meningkat dengan meningkatnya konduktivitas termal PCM. Hal ini disebabkan oleh peningkatan koefisien perpindahan panas keseluruhan dinding, sehingga meningkatkan laju panas dari luar dinding ke ruangan. Hal ini mengakibatkan meningkatnya beban pendingin untuk mempertahankan suhu ruangan pada kondisi yang diinginkan. Dari hasil perhitungan diperoleh konduktivitas termal ($k=0.02$ W/mK) memberikan beban pendingin yang paling minimum.



Gambar 19. Pengaruh konduktivitas termal PCM terhadap beban pendingin

Hasil simulasi ketebalan komposit PCM paling optimal untuk digunakan sehingga memberikan beban pendingin yang minimum ditunjukkan dalam gambar 20. Dari gambar terlihat bahwa dengan peningkatan ketebalan PCM beban pendingin terus menurun dan menghasilkan kondisi optimal pada ketebalan $x=0.02$ m.



Gambar 20. Hubungan penyimpanan energi tahunan dengan ketebalan PCM

4. Kesimpulan

Penggunaan materi perubahan fasa sebagai material penyimpan energi termal pada gedung bangunan mampu menurunkan pemakaian energi dalam gedung. Sementara PCM dapat ditambahkan secara langsung atau dalam bentuk mikro ke dalam beton. Sebagai contoh, hasil pengujian beton yang dilengkapi dengan lilin lebah sebagai PCM, mengalami penurunan kuat beton, tetapi di sisi lain mampu menyerap dan menyimpan energi panas. Hasil analisis kelayakan awal pemanfaatan PCM dalam aplikasi pada gedung bangunan mampu menurunkan beban pendingin dalam ruangan. Penelitian lebih lanjut dan pengujian lapangan akan sangat diperlukan untuk memperkuat bukti keuntungan penggunaan PCM pada bangunan gedung.

Referensi

- [1] Ministry Of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia. Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia. 2017;72.
- [2] Republik Indonesia P. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional. 2014. p. 36.
- [3] Direktorat Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Panduan Pengguna Untuk Sektor Komersial (Indonesia 2020 Pathway Calculator). Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2014;1–15.
- [4] Li G, Zheng X. Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2016 Sep 1 [cited 2018 Mar 25];62:736–57. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301095?via%3Dihub>
- [5] Sharma A, Tyagi V V., Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(2):318–45.
- [6] Memon SA. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:870–906.
- [7] Sari A, Karaipekli A. Fatty acid esters-based composite phase change materials for thermal energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2012;37:208–16.
- [8] Sari A, Karaipekli A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of palmitic acid/expanded graphite composite as form-stable PCM for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009;93(5):571–6.
- [9] Wang E, Kong X, Rong X, Yao C, Yang H, Qi C. A Study on a Novel Phase Change Material Panel Based on Tetradecanol/Lauric

- Acid/Expanded Perlite/Aluminium Powder for Building Heat Storage. *Materials*. 2016;9(11):896.
- [10] Xu B, Li Z. Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage. *Applied Energy*. 2013;105:229–37.
- [11] Amin M, Putra N, Kosasih EA, Prawiro E, Luanto RA, Mahlia TMI. Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications. *Applied Thermal Engineering*. 2017;112:273–80.
- [12] Cui H, Memon SA, Liu R. Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete. *Energy and Buildings*. 2015;96:162–74.
- [13] Castell A, Martorell I, Medrano M, Perez G, Cabeza LF. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*. 2010;42(4):534–40.
- [14] Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2010;42(9):1361–8.
- [15] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2011 Apr 1 [cited 2018 Mar 25];15(3):1675–95. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003874?via%3Dihub>
- [16] Barrenechea C, Navarro H, Serrano S, Cabeza LF, Fernández AI. New database on phase change materials for thermal energy storage in buildings to help PCM selection. *Energy Procedia* [Internet]. 2014;57:2408–15. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.249>
- [17] Cui Y, Xie J, Liu J, Pan S. Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. *Procedia Engineering* [Internet]. 2015;121:763–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.027>
- [18] Grega Klancnik, Jozef Medved PM. Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation. *Materials and Geoenvironment*. 2010;57(1):127–42.
- [19] Yinping Z, Yi J. A simple method , the T - history method , of determining the heat of fusion , specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology*. 1999;10(3):201–5.
- [20] Mandilaras I, Stamatiadou M, Katsourinis D, Zannis G, Founti M. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment*. 2013;61:93–103.
- [21] Shukla N, Fallahi A, Kosny J. Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications. *Energy Procedia* 30 (2012) 370 – 379 SHC. 2012;30:370–9.
- [22] Feldman, D., Banu, D., & Hawes, D. W. (1995). Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(2), 147–157.
- [23] Bentz, D. P., & Turpin, R. (2007). Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 527–532.
- [24] Zhang Y, Zhou G, Lin K, Zhang Q, Di H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*. 2007;42(6):2197–209.
- [25] Alam TE, Dhau JS, Goswami DY, Stefanakos E. Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems. *Applied Energy*. 2015;154(September):92–101.