

## **ECO-GREEN AIR COOLER SYSTEM: PEMANFAATAN PHASE CHANGE MATERIAL SEBAGAI ALTERNATIF PENGGANTI AIR CONDITIONING DI KOTA PEKANBARU**

**Nurfi Hikma<sup>\*</sup>, Saktioto**

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

\*E-mail korespondensi: nurfihikma9998@gmail.com

### **ABSTRACT**

*High temperatures in Pekanbaru city, have caused the human thermal comfort remain unfulfilled. The average thermal comfort of Indonesian population is about 24 °C, which is much lower than the air temperature of Pekanbaru which is 35.9 °C during the day. The use of AC (Air Conditioning) is one of the most preferred ways to achieve the thermal comfort. However, the use of AC may also have other harmful effects, such as high energy consumption and Green House Gas (GHG). PCM (Phase Change Material) is a material that is able to store latent heat. Considering Pekanbaru city has a low temperature at night, then PCM can be used as a renewable energy source. Therefore, the authors propose an idea called EGACY (Eco-Green Air Cooler System) which collaborates PCM with the free cooling and passive cooling systems. EGACY is designed as an air conditioner that comes from renewable energy. The components of the EGACY is salt hydrates, PCM boxes, iron pipes, fans, solar panels and batteries as the main components and several other supporting components. EGACY system work by absorbing cold air at night through pipes connected to the outside of the room, stored by PCM and then released during the day through ventilation mounted on the ceiling. The resulting temperature in the room is controlled at a comfortable temperature of 24.9 °C to 28 °C. The EGACY will be implemented in stages, starting with the existing lodging building in Pekanbaru City.*

**Keywords:** EGACY, Free cooling, Passive cooling, Pekanbaru, PCM, Thermal comfort.

### **ABSTRAK**

*Tingginya suhu di Kota Pekanbaru menyebabkan tidak tercapainya suhu kenyamanan bagi setiap individu. Suhu thermal comfort bagi masyarakat Indonesia adalah sekitar 24 °C, yang lebih rendah dari suhu sepanjang hari di Kota Pekanbaru yaitu 35.9 °C. Menggunakan AC (Air Conditioning) merupakan satu-satunya cara untuk mendapatkan thermal comfort tersebut. Bagaimanapun, penggunaan AC dapat berakibat buruk, seperti konsumsi energi yang tinggi dan efek gas rumah kaca (GHG). PCM (Phase Change Material) adalah material penyimpanan panas laten. Mengingat jika Pekanbaru mempunyai suhu yang rendah di malam hari dan dapat dijadikan sebagai sumber energy terbarukan. Maka dari itu, penulis memberikan gagasan yang disebut EGACY (Eco-Green Air Cooler System) yang dikolaborasikan dengan PCM, passive cooling dan free cooling. EGACY dirancang sebagai pendingin ruangan yang berasal dari energiterbarukan. Komponen EGACY terdiri dari material seperti garam hidrat, kotak PCM, pipa besi, kipas, panel surya dan baterai sebagai komponen utama serta beberapa komponen pendukung lainnya. Sistem EGACY adalah menyerap udara dingin di malam hari melalui pipa-pipa yang dihubungkan ke luar ruangan, disimpan oleh PCM dan kemudian dilepaskan di siang hari melalui ventilasi yang dipasang pada plafon. Suhu yang dihasilkan di ruangan adalah terkontrol pada suhu kenyamanan yaitu 24,9 °C hingga 28 °C. Penerapan EGACY dimulai secara bertahap, dimulai dari bangunan penginapan di Kota Pekanbaru.*

**Kata kunci:** EGACY, Free cooling, Passive cooling, Pekanbaru, PCM, Thermal comfort.

### **PENDAHULUAN**

Suhu rata-rata udara di Provinsi Riau berdasarkan informasi dari BPS (Badan Pusat

Statistik) pada tahun 2019 berkisar antara 21,0-35,9 °C. Suhu yang mencapai 35,9 °C menyebabkan warga Provinsi Riau tepatnya di Kota Pekanbaru merasakan hawa yang cukup

panas, terutama pada siang hari. Suhu tersebut merupakan suhu yang dihitung panas sehingga Pekanbaru menjadi kota terpanas di Indonesia pada tahun 2019 [1]. Suhu yang sedemikian panas tentunya akan mengganggu aktivitas manusianya sendiri, karena kondisi udara yang nyaman untuk orang Indonesia adalah berada pada rentang suhu 24,9 °C hingga 28 °C. Kondisi pada suhu itu disebut dengan kenyamanan termal atau *thermal comfort*.

Suatu cara yang banyak dilakukan untuk mendapatkan kenyamanan tersebut adalah dengan pengkondisian udara secara mekanis yaitu dengan penggunaan AC. Mekanisme pendinginan ruangan oleh AC menggunakan energi sedikitnya 340 Watt hingga 2000 Watt. Di samping itu, penggunaan AC pastinya akan berdampak buruk baik bagi lingkungan maupun untuk pasokan energi yang ada khususnya di Indonesia. Di negara-negara berkembang, pendingin ini dapat menyebabkan lebih dari setengah konsumsi listrik dari satu tempat tinggal. Namun penggunaannya tidak dapat ditekan karena belum ada alternatif lain yang ramah lingkungan dan lebih efektif dalam mengatasi perubahan suhu rata-rata tersebut [2]. Oleh sebab itulah, penulis telah mengembangkan analisis tentang pemanfaatan energi terbarukan (*sustainable energy*) sebagai alternatif energi yang lebih hemat dalam menangani perubahan iklim.

Alternatif hemat energi yang dapat digunakan adalah dengan penggunaan metode penyimpanan energi. Sistem penyimpanan energi termal atau *Thermal Energy Storage (TES)* dapat membantu mengurangi energi bangunan, kontribusi pada manajemen energi yang efisien dan untuk meningkatkan kenyamanan penghuni di dalam ruangan. Karenanya, pengembangan sistem TES dapat dicapai dengan penyimpanan panas sederhana, penyimpanan panas laten dan penyimpanan energi kimia. Namun, dibandingkan dengan dua metode lain, metode penyimpanan panas laten dengan aplikasi bahan ganti fasa atau PCM lebih banyak diselidiki dalam beberapa dekade terakhir karena potensi manfaatnya dari kapasitas panas volumetrik yang tinggi dan variasi suhu yang sempit selama proses transisi

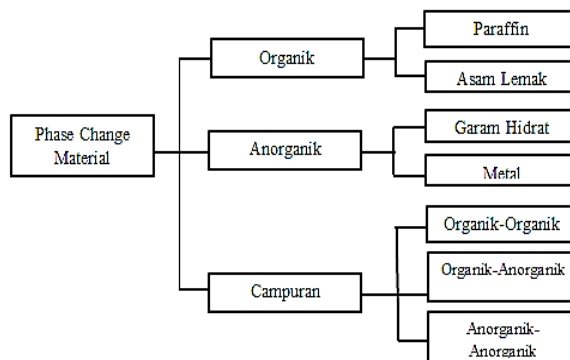
fasa. PCM menyerap energi atau melepaskan energi yang setara dengan panas latennya ketika suhu material mengalami atau melampaui suhu perubahan fasa.

Metode *passive* dan *free cooling* telah dipelajari oleh para peneliti sebelumnya. Sistem TES aktif mengintegrasikan PCM ke dalam sistem HVAC, seperti unit pendingin udara, sistem pemanas lantai dan pompa panas tanah domestik untuk mengurangi permintaan energi tinggi dan konsumsi energi tahunan [3-5]. Yamaha mengusulkan sistem distribusi udara dengan PCM di saluran udara untuk tujuan pemindahan beban puncak. Telah ditunjukkan bahwa dengan jumlah PCM yang memadai, suhu ruangan yang konstan dapat dipertahankan tanpa operasi sumber pendingin. Sehingga tujuan utama dari penulisan gagasan ini adalah untuk menganalisis metode pendingin yang lebih efektif dengan bantuan PCM pada gedung bangunan di Kota Pekanbaru.

## TINJAUAN PUSTAKA

### *Phase Change Material (PCM)*

PCM merupakan bahan penyimpanan energi laten yang mampu melepaskan energi dalam jangka waktu yang sangat lama tanpa terjadinya perubahan suhu [6]. Hal tersebut terjadi ketika bahan berubah bentuk baik dari cair ke padat maupun sebaliknya. Proses inilah yang dinamakan dengan perubahan fasa. Secara umum, klasifikasi dari PCM dijelaskan pada Gambar berikut:



**Gambar 1.** Klasifikasi PCM [7].

Ada berbagai jenis PCM yang digunakan dalam penelitian. PCM organik umumnya tidak digunakan karena harga yang cukup mahal dan tidak terlalu efektif. Selanjutnya PCM anorganik dibagi menjadi hidrat garam dan metal. Garam hidrat sendiri merupakan proses dehidrasi yaitu perubahan bentuk dari padat ke cair. Garam hidrat terdiri dari campuran garam anorganik dan air membentuk padatan kristal  $MnH_2O$ . Bahan ini banyak digunakan dalam penelitian karena sifat-sifatnya yaitu panas peleburan laten yang cukup tinggi, volume selama meleleh kecil, konduktivitas tinggi dan tidak terlalu korosif serta harga yang relatif murah. Disamping itu, metal atau disebut juga dengan logam tidak terlalu banyak diperhatikan karena bahannya yang cukup berat ketika digunakan [7]. Terakhir PCM kombinasi yaitu komposisi berupa lelehan yang terendah dari dua komponen atau lebih yang masing-masingnya meleleh dan juga membeku sehingga terbentuk campuran dari komponen kristal tanpa adanya proses kristalisasi. PCM jenis ini juga tidak banyak digunakan karena sifat dasarnya selalu meleleh dan membeku tanpa adanya pemisahan. Hal inilah yang menyulitkan komponennya untuk memisahkan diri [6].

### ***Passive Cooling***

*Passive cooling* merupakan salah satu strategi dalam pengendalian *thermal comfort* pada bangunan. Ini tergantung pada dua kondisi: ketersediaan pendingin yang pada suhu lebih rendah dari udara dalam ruangan, dan promosi perpindahan panas ke arah wastafel. *Passive cooling* sangat bergantung kepada lingkungan sebagai sumber pendinginnya. Pendingin lingkungan adalah berupa udara terbuka, air, langit dan tanah dalam bentuk ventilasi dan lain sebagainya [8].

Teknologi pendingin yang biasa digunakan diberbagai belahan dunia biasa mengadopsi dari negara 4 musim. Teknologi yang ada tersebut menyesuaikan dengan 2 iklim yang sangat ekstrim yaitu panas dan dingin. Sedangkan pada daerah tropis lebih memusatkan kepada bagaimana mengurangi transfer panas ke bangunan [9]. *Passive cooling* atau metode pasif

disebut teknologi dimana sistem TES dioperasikan tanpa pasokan energi eksternal. Aplikasi khas dari metode pasif dalam PCM yang diintegrasikan ke dalam struktur bangunan seperti dinding, lantai, langit-langit dan bahan atap.

### ***Free Cooling***

*Free cooling* adalah sebuah metode penggunaan suhu udara eksternal rendah untuk membantu beroperasinya pendingin ruangan secara ekonomis. Metode ini juga sebagai media penyimpanan udara dingin tanpa menggunakan perangkat elektronika [10]. Udara/air sebagai sumber dingin dapat digunakan saat itu juga ataupun disimpan terlebih dahulu. Pada saat udara luar lebih dingin daripada di dalam ruangan, *free cooling* akan memanfaatkan udara tersebut sebagai sumber pendinginnya. Sistem ini dapat menggantikan fungsi *chiller* dalam sistem pendingin yang biasa digunakan. Aplikasi sistem ini dapat diterapkan pada bagian dinding bangunan biasa ataupun industri.

Media penyimpanan untuk *free cooling* berupa jenis energi laten. Salah satunya adalah PCM. *Free cooling* juga bertindak seperti kipas yang digunakan untuk menyimpan dan mengekstrak sumber pendingin udara pada PCM. Sistemnya mengacu kepada teknologi atau teknik yang juga digunakan untuk interior bangunan seperti ventilasi. Namun perbedaan antara *free cooling* dan ventilasi biasa ada pada fungsi struktur bangunannya. Ventilasi biasanya berfungsi sebagai media penyimpanan sementara. Sedangkan *free cooling* terpisah antara penyimpanan dinginnya dan alat mekanis. Sumber pendingin seperti udara sekitar ataupun tanah dapat menjadi sumber dari *free cooling* tersebut. Jadi, *free cooling* dimaksudkan menurut kondisi eksternal darimana sumber pendingin/PCM itu berasal.

### ***Perpindahan Kalor***

Perpindahan kalor terjadi dalam 3 bentuk yaitu konduksi atau hantaran, konveksi atau aliran dan radiasi atau pancaran. Ketiga bentuk perpindahan tersebut terjadi dalam pembahasan ini.

Perpindahan panas (kalor) dengan cara radiasi adalah perpindahan kalor dalam bentuk gelombang yaitu berupa gelombang elektromagnetik. Disini yang terjadi adalah perpindahan kalor dari matahari menuju bumi dan selanjutnya kepada bahan bangunan [11].

Selanjutnya, Konduksi dan konveksi juga banyak terjadi di kehidupan kita sehari-hari. Konduksi adalah penjalaran gelombang panas tanpa disertai adanya perpindahan bagian-bagian zat perantaranya. Pada bangunan, konduksi terjadi melalui infiltrasi udara lewat celah-celah atau bukaan selubung bangunan tersebut. Sedangkan konveksi adalah pergerakan dari molekul-molekul pada suatu fluida. Contohnya panas yang masuk melalui selubung bangunan dan partisi interior. Dalam konsep konduksi ini pula yang mengatakan jika ada pergantian posisi molekul yang lebih dingin dan lebih panas. Molekul yang dingin, pergerakannya akan cenderung ke bawah. Tetapi molekul panas akan bergerak keatas.

Temperatur permukaan dan perpindahan panas pada dinding akan berbeda jika besar energi yang diterima dinding vertikal dan horizontal berbeda, sehingga besar perpindahan panasnya tentu akan berbeda juga sesuai dengan persamaan Newton tentang konveksi sebagai berikut.

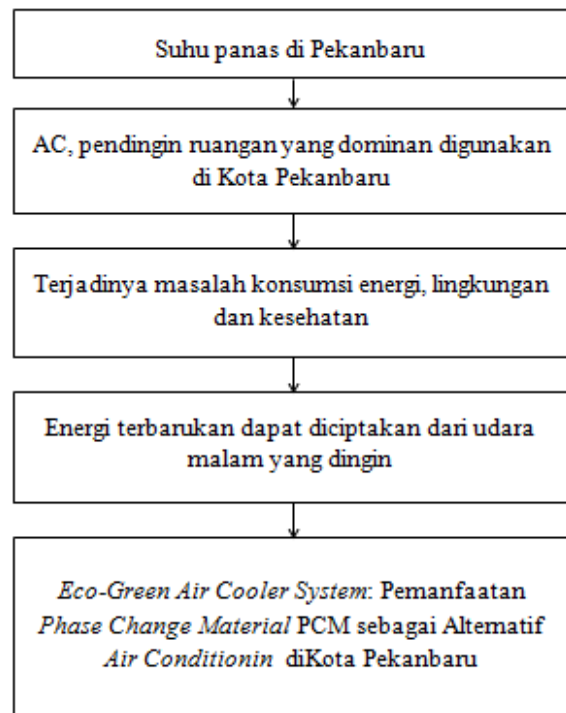
$$\dot{Q}_{conv} = hA (T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

dimana, h adalah koefisien perpindahan panas, A adalah luas permukaan, dan T adalah temperature [11].

## METODE PENELITIAN

Penulisan yang dilakukan oleh penulis adalah jenis penulisan deskriptif dengan pendekatan kuantitatif yang menghasilkan sebuah data dan sintesis. Metode pengumpulan data dalam bentuk studi literatur, membandingkan dan menganalisis antara penelitian satu dan yang lainnya. Telaah pustaka yang dilakukan penulis bersumber dari buku, artikel dan tulisan ilmiah lainnya baik itu nasional maupun internasional. Sehingga pada akhirnya terbentuklah suatu inovasi yang mengkombinasikan beberapa

metode secara bersamaan. Dengan begitu, efektivitas dari satu metode yang pernah diterapkan dapat dioptimalkan lebih lanjut lagi.



**Gambar 2.** Metode proses EGACY.

Gagasan yang disusun didasarkan kepada permasalahan dan analisis data terkait solusi yang pernah ditawarkan oleh peneliti sebelumnya. Permasalahan adalah mengenai peningkatan konsumsi energi yang terjadi di Kota Pekanbaru. Peningkatan itu sendiri terjadi pada penggunaan AC sebagai pendingin ruangan di daerah yang panas, Kota Pekanbaru. Perbandingan antara solusi satu dan yang lainnya pun turut dilakukan oleh penulis. Baik itu dengan metode PCM saja, *passive cooling* saja, *free cooling* saja ataupun *passive cooling* dan PCM secara bersamaan. Setelah itu, terciptalah suatu inovasi terbaru yang lebih kompleks dalam penyelesaian masalah yang terjadi. Solusi itu berupa sistem yang mencakup ketiga metode tersebut secara bersamaan. Penulis memberikan solusi itu dengan sebutan EGACY. Kerangka gagasan yang dijabarkan dalam bentuk diagram dapat dilihat pada Gambar 2.

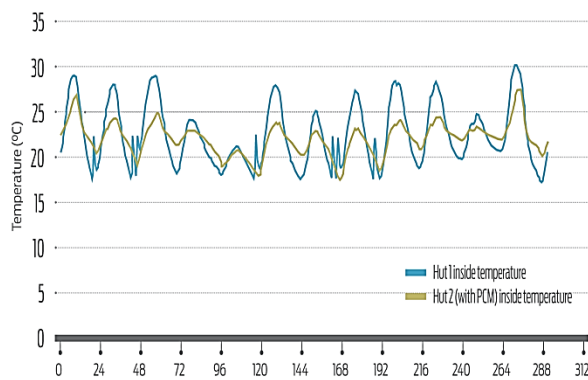
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi dari PCM ini dapat digunakan sebagai perlindungan panas maupun

penyimpanan. Contohnya ketika diterapkan pada bangunan ada 2 konsep yang dapat digunakan yaitu memanfaatkan panas matahari pada siang hari ataupun dingin pada malam hari [7]. Baik untuk pemanfaatan panas atau dingin, PCM dapat diletakkan di dalam dinding, komponen bangunan selain dinding dan di dalam pemanas ataupun pendingin ruangan. Konsep yang dibahas penulis adalah pendingin ruangan dimana udara dingin pada malam hari akan disimpan dan dilepaskan ketika siangnya.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh [12] terkait metode *passive cooling* pada bangunan di musim panas mendapatkan hasil bahwa penggunaan metode ini sangat menguntungkan. *Passive cooling* dapat mengurangi suhu sekitar menggunakan pendinginan *evaporative* secara langsung. Penelitian ini dilakukan selama beberapa hari dan diamati perubahan suhu yang terjadi. Berdasarkan perbedaan antara suhu *wet bulb* dan suhu lingkungan ( $T_{wb}$  dan  $T_{amb}$ ). Metode *passive cooling* akan mengurangi suhu  $T_{wb}$  atau suhu dalam dengan rata-rata penurunan 7,1-7,8 °C untuk hari pertama dan hari kedua. Masing-masing nilai itu sesuai dengan potensi maksimum dari teori pendinginan *evaporative* dari Louver pada kelembaban relatif 100%.

Selanjutnya hasil penelitian dari [13] dan didukung juga oleh penelitian [14] mengenai kinerja generator secara *passive cooling* adalah adanya variasi suhu yang didapatkan ketika *passive cooling* diaplikasikan. Suhu dalam ruang didapatkan lebih rendah daripada suhu luar ruangan. Begitu pula hasil penelitian dari [15] tentang *passive cooling*-PCM dan *free cooling*-PCM yang dicoba di aplikasikan ke dalam miniatur bangunan duplex dengan keadaan wilayah di Melbourne mendapatkan akhiran yang sama yaitu penurunan suhu. Hasil yang didapatkan adalah adanya perbedaan antara pemakaian PCM dan tanpa PCM yaitu suhu didapatkan akan lebih rendah jika menggunakan PCM. Begitu pula penurunan suhu yang dipublikasikan [16] mendapatkan perbedaan hasil akhir berupa suhu pada bangunan dengan dan tanpa AC seperti pada Gambar 3 berikut.



**Gambar 3.** Suhu dengan dan Tanpa PCM [16].

Berdasarkan analisis sebelumnya, tesis penulis dinamakan dengan EGACY. EGACY adalah sebuah metode pemanfaatan material yang dapat merubah panas laten yang disebut dengan PCM. PCM anorganik dibagi menjadi garam hidrat dan metal. Garam hidrat sendiri merupakan proses dehidrasi yaitu perubahan bentuk dari padat ke cair. Garam hidrat terdiri dari campuran garam anorganik dan air membentuk padatan kristal  $MnH_2O$  yang dapat dilihat pada Gambar 4. Bahan ini banyak digunakan dalam penelitian karena sifat-sifatnya yaitu panas peleburan laten yang cukup tinggi, volume selama meleleh kecil, konduktivitas tinggi dan tidak terlalu korosif serta harga yang relatif murah. Berikut Gambaran garam anorganik yang berfungsi sebagai PCM.

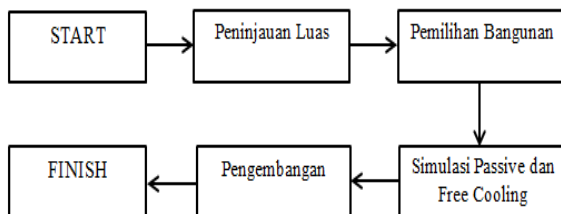


**Gambar 4.** Garam hidrat/anorganik [1].

Pada bangunan gedung (disini penulis mengambil model bangunan lantai 2), sistem ini akan dipasangkan diatas plafon dengan desain gedung bangunan akan dibuat seperti pada Gambar 5 dibawah ini.



**Gambar 5.** Desain Bangunan dengan Konsep EGACY.

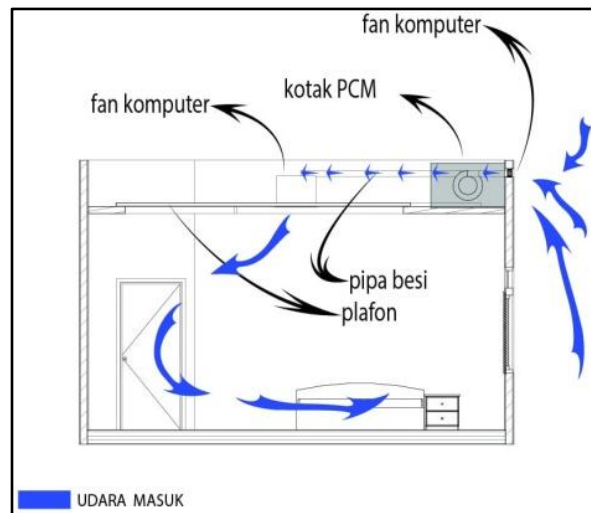


**Gambar 6.** Bagan mekanisme penerapan EGACY.

Komponen penyusun dari *passive cooling* dan *free cooling* pada bangunan dengan penggunaan PCM terdiri dari garam anorganik (*salt hydrate*), tangki PCM, kipas ventilasi, pipa besi, panel surya, baterai, sensor suhu kelvin, Aplikasi EnergyPlus v8.3 dan anemometer serta beberapa komponen penyusun lainnya. Sementara prosedur dari implementasi EGACY seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Konsep dari EGACY ini adalah dengan penerapan dua metode dalam waktu yang bersamaan yaitu *passive cooling* dan *free cooling*. *Passive cooling* adalah metode penurunan suhu

ruangan tanpa menggunakan perangkat elektronika. Sedangkan *free cooling* adalah metode penggunaan udara luar/eksternal untuk membantu AC dalam mendinginkan udara pada ruangan. Lebih lanjut, model EGACY ini akan mengambil dinginnya suhu di malam hari yang mencapai 23 °C dan melepaskannya di siang hari. Rentang suhu itulah yang diperkirakan akan dihasilkan siang harinya (suhu *thermal comfort*). Prinsip kerja EGACY berupa penerapan pada bangunan ditunjukkan pada Gambar 7 di bawah ini.



**Gambar 7.** Prinsip Kerja EGACY.

Udara dialirkan dengan kipas yang dipasang pada dinding bangunan. Penggerak dari kipasnya adalah panel surya yang energinya akan disimpan oleh baterai pada siang hari untuk dipakai oleh kipas malam harinya. Suhu dingin malam hari tersebut akan disimpan terlebih dahulu oleh PCM untuk kemudian dilepaskan pada siang hari. Unit penyimpanan PCM ini diisolasi di semua sisi pada bagian atas untuk meminimalkan perpindahan panas internal dan eksternal pada kotak PCM. Oleh karena itu, kondisi batas adiabatik digunakan di dinding bawah dan samping domain PCM serta batas suhu dibagian atasnya. Udara yang masuk keruangan akan dialirkan ke seluruh bagian ruangan (*free cooling*). Udara dingin akan bergerak ke bawah menggantikan posisi udara panas. Udara panas akan bergerak keatas dan akhirnya keluar melewati ventilasi (*passive cooling*). Begitulah

sirkulasi yang terjadi terus menerus. Pergerakan itu mengikuti aturan konveksi udara.

Bangunan ataupun rumah biasa dapat memakai konsep EGACY ini. Model numerik *free cooling* dilakukan dalam dua bagian: a) pemodelan penukaran panas PCM menggunakan dinamika fluida komputasi (CFD) dan b) simulasi bangunan menggunakan EnergyPlus. Model CFD untuk perpindahan panas antara udara dan unit penyimpanan panas PCM dikembangkan menggunakan ANSYS CFX V15.0. Mesh tersebut berisi dua wilayah: Fluida (udara) dan Padat (PCM). Domain fluida terdiri dari jaringan pipa dimana udara akan disuplai. Mesh itu disempurnakan pada antarmuka cairan padat menggunakan kedekatan fungsi dan kelengkungan ukuran lebih lanjut. PCM diasumsikan padat walaupun pada kenyataannya dapat berubah menjadi cair ketika melebihi suhu transisi fasa (22,5°C, dalam hal ini). PCM anorganik berada pada rentang transisi fasa 22-23°C.

## KESIMPULAN

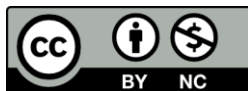
Penggunaan metode PCM telah banyak diteliti oleh para ilmuwan dikarenakan sifatnya yang dapat menyimpan dan melepaskan panas laten tanpa menghilangkan/merubah suhu tersebut. Begitu pula dengan metode *passive cooling* dan *free cooling* juga telah banyak mendapat perhatian lebih lanjut. Namun, di Indonesia sendiri belum ada yang dapat mengkombinasikan ketiga hal tersebut secara aplikatif. Dengan adanya gagasan penulis ini, AC yang semula digunakan secara masif dapat digantikan oleh EGACY secara berkala. Penyediaan PCM serta desain seperti pada Gambar 2 dapat diterapkan dengan mudah. Sehingga pada saat malam hari, suhu dingin di Kota Pekanbaru dapat digunakan sebagai sumber energi pendingin yang disimpan terlebih dahulu oleh PCM untuk kemudian dilepaskan di siang hari. Melalui pipa yang terhubung ke bangunan, akan membuat udara teralirkan ke dalam ruangan dan kemudian tersebar ke seluruh bagian ruangan. Ketika ini diterapkan, maka kebermanfaatannya sebagai pendingin yang ramah lingkungan, ekonomis dan

tentunya hemat energi akan didapatkan. Kerjasama yang baik dengan BPS dan pemerintah daerah setempat juga sangat dibutuhkan untuk meninjau perubahan suhu yang terjadi di Kota Pekanbaru secara berkala.

## REFERENSI

1. Mahadi, S. (2019). *9 Kota terpanas di Indonesia. Bacanya aja udah bikin gerah*. Diakses pada 16 Agustus 2020, URL: <https://www.99.co/blog/indonesia/kota-ter-panas-di-indonesia/>.
2. Hamdy, M., Hasan, A., & Siren, K. (2011). Applying a multi-objective optimization approach for design of low-emission cost-effective dwellings. *J. Build. Environ.*, 46, 109–123.
3. Fang, G., Wu, S., & Liu, X. (2010). Experimental study on cool storage air-conditioning system with spherical capsules packed bed. *J. Energy Build.*, 42, 1056–1062.
4. Mazo, J., Delgado, M., Marin, J. M., & Zalba. (2012). Modeling a radiant floor system with phase change material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *J. Energy Build.*, 47, 458–466.
5. Moreno, P., Sole, C., Castell, A., & Cabaze, F. (2014). The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: A review. *J. Renewable Sustainable Energy Rev.*, 39, 1–13.
6. Pudjiastuti, W. (2011). Jenis-Jenis Bahan Berubah Fasa dan Aplikasinya. *Jurnal Kimia Kemasan*, 33, 118–123.
7. Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, A. C., Silikhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Rahman, S. M. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *J. Energies*, 12, 1–20.
8. Choudhary, S., Thakur, M. S., & Dogne, N. (2014). Passive cooling techniques, design concept and ventilation techniques. *E-*

- Proceeding TEQIP-II/Civil/AICMT-2*, Gwalior, September 2014, 5–10.
9. Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *J. Energy Build.*, 59, 83–103.
  10. Waqas, A. & Din, A.U. (2013). Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-A review. *J. Renewable Sustainable Energy Rev.*, 18, 607–625.
  11. Palinggi, A., Rerung, O. D., & Hattu, E. P. D. (2018). Kajian penggunaan sinar matahari untuk pengkondisian udara ruangan menggunakan batu alam Pulau Timor sebagai penyerap panas pada sistem dinding Trombe. *Jurnal Teknik Sipil*, 3, 215–221.
  12. Rio, M. A. D., Asawa, T., Hirayama, Y., Sato, R., & Ohta, I. (2019). Evaluation of passive cooling methods to improve microclimate for natural ventilation of a house during summer. *J. Build. Environ.*, 149, 275–287.
  13. Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones-the state of art. *J. Energy Build.*, 198, 467–490.
  14. El-Adl, A. S., Mousa, M. G., & Hegazi, A. A. (2018). Performance analysis of a passively cooled thermoelectric generator. *J. Energy Conversion Manage.*, 178, 399–411.
  15. Alam, M., Jamil, H., Sanjayan, J., & Wilson, J. (2014). Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. *J. Energy Build.*, 78, 192–201.
  16. Farid, M. (2016). *Phase change materials*. Diakses pada tanggal 19 Agustus 2020, URL: <https://www.buildmagazine.org.nz/index.php/articles/show/phase-change-materials>.



Artikel ini menggunakan lisensi  
[Creative Commons Attribution  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)