Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Heat Transfer Analysis of Deep Coaxial Geothermal Heat Exchangers: Insights Into Heat-Flux Distribution on Borehole Wall

Idris Ujung [1], ***Nasruddin A. Abdullah*** [2], ***Suheri*** [3]

[1,2,3)] *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Samudra, Langsa 24416, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 10 Mei 2025
Direvisi dari 20 Juli 2025
Diterima 29 Oktober 2025
Dipublikasi 30 Desember 2025

***Keywoard's*:**
Briquettes;
Pyrolysis;
red calliandra wood;
molasse.

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v12i02.12095

A B S T R A C T

Briquettes are solid fuel that can be used as an alternative energy source. Making biocharcoal briquettes is one way to convert a biomass energy source into another biomass by compressing it and making it into a more regular shape. In this research, red calliandra wood was used using the pyrolysis method, temperature variations and adhesive variations. The pyrolysis temperatures used are 300°C, 400°C, and 500°C with a pyrolysis time of 60 minutes. Then, the briquettes are molded with a ratio of charcoal and molasses (cane molasses) of 90:10 and 70:30. Briquettes are tested using the SNI 01-6235-2000 method, namely calorific value, water content, ash content and volatile matter. Of the 6 samples taken, almost all met the standards and sample A briquettes obtained the best results with a composition of 90% charcoal and 10% adhesive at a temperature of 500, producing a calorific value of 6945.67 cal/gr, water content of 6.35%, ash content of 7, 76%, volatile matter 10.81% and bound carbon 77.72%.

A B S T R A K

Briket adalah bahan bakar padat yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif. Pembuatan briket bioarang merupakan salah satu cara untuk mengubah suatu sumber energi biomassa menjadi bentuk lain dari biomassa dengan cara mengompresinya dan membuat bentuk menjadi lebih teratur. Pada penelitian kali ini menggunakan bahan kayu kaliandra merah dengan metode pirolisis, variasi suhu dan variasi perekat. Suhu pirolisis yang dipakai adalah 300°C, 400°C, dan 500°C dengan lama pirolisis selama 60 menit. Kemudian briket dicetak dengan perbandian arang dan molase (tetes tebu) 90%:10% dan 70%:30%. Briket tersebut di uji dengan metode SNI 01-6235-2000 yaitu nilai kalor, kadar air, kadar abu, dan zat terbang. Dari 6 sampel yang di ambil hampir seluruhnya memenuhi standar dan briket sampel A mendapakan hasil terbaik dengan komposisi 90% arang dan 10% perekat pada suhu 500 menghasikan nilai kalor 6945,67 kal/gr, kadar air 6,35%, kadar abu 7,76%, zat terbang 10,81% dan karbon terikat 77,72%.

© 2025 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

1. Pendahuluan

Manusia tidak dapat dipisahkan dari berurusan dengan energi. Pasokan energi saat ini menjadi masalah yang sangat mempengaruhi kehidupan masyarakat dalam banyak hal. Masalah ini dipicu oleh pertumbuhan populasi, biaya penelitian yang tinggi, sulitnya menemukan sumur minyak, dan banyaknya tuntutan masyarakat global terhadap emisi limbah gas karbon. Oleh karena itu, tidak jarang muncul beberapa isu lingkungan dari upaya masyarakat untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut. Oleh karena itu diperlukan suatu alternatif untuk mencegah penggunaan bahan bakar tersebut. Salah satu opsi yang memungkinkan adalah penggunaan energi dari biomassa[1].

Biomassa secara umum dipahami sebagai jumlah total sumber daya alam yang dapat digunakan dalam bentuk energi dan material. Kategori ini meliputi kayu, rumput, alga, mikroalga, limbah pertanian, limbah hutan, dan limbah rumah tangga. Biomassa terdiri dari campuran kompleks bahan organik, yaitu karbohidrat, lemak, protein dan sejumlah

E-mail Coresponden : nasruddin@unsam.ac.id
© 2025 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

kecil mineral lain seperti natrium, fosfor, kalsium, dan besi[2]. Pemanfaatan limbah biomassa dalam bentuk aslinya sangat sulit untuk diangkut karena laju pembakarannya yang rendah, kadar air yang tinggi, dan nilai kalor yang rendah. Oleh karena itu, perlu dikembangkan teknologi untuk meningkatkan minat pemanfaatan limbah biomassa dengan cara memadatkan limbah biomassa menjadi bahan bakar padat melalui proses pemadatan[3].

Briket adalah bahan berupa serbuk-serbuk kecil yang dipres dengan mesin press dan dicampur dengan lem untuk memadatnya. Perubahan ukuran material dilakukan melalui proses aglomerasi dengan tekanan dan dengan atau tanpa penambahan bahan pengikat. Briket arang dibuat dengan mencampurkan bahan-bahan yang mengandung karbon tinggi dan menekannya di bawah tekanan tertentu dan memanaskannya pada suhu tertentu agar kadar airnya dijaga serendah mungkin, sehingga menghasilkan bahan bakar yang sangat padat dan tahan suhu tinggi, nilai kalor yang tinggi serta asap buangan yang minimum[4].

Kayu kaliandra merah merupakan tanaman asal guatamala yang dapat menghasilkan kalori sekitar 4600 kkal/kg untuk kayu kering dan 7200 kkal /kg untuk arang yang setara dengan batubara. Emisi buangan CO2 dari wood pellet kaliandra 8 kali lebih rendah dari pada bahan bakar gas serta 10 kali lebih rendah dari pada batu bara dan bahan bakar minyak . Dengan demikian, kaliandra merah dapat menjadi upaya pemulihan dan penghijauan lahan pascatambang dan langkah menuju produksi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Tanaman kaliandra merah memiliki berbagai manfaat yaitu kayu energi, pakan ternak, mencegah erosi dan memperbaiki unsur hara pada tanah yang gersang. Melihat dari beberapa jurnal yang saya telusuri kayu kaliandra sangat efektif dibuah sebagai bahan bagi briket. Karena kayu kaliandra merah memiliki nilai kalor yang cukup tinggi yaitu sekitar 4.600 kkl[5].

Molase atau tetes tebu, adalah produk dari industri pembuatan gula. Molase adalah residu industri terpenting dalam pemurnian gula. Molase adalah sumber energi yang penting karena gula yang dikandungnya. Oleh karena itu, tetes tebu yang memiliki nilai gizi yang cukup baik banyak digunakan sebagai bahan tambahan pangan[6].

Pirolisis adalah proses pemanasan tanpa udara atau sedikit udara dengan kisaran suhu 200-600°C. Proses pirolisis dimulai pada suhu tinggi dan tanpa adanya O2. Secara umum pirolisis biomassa merupakan penguraian bahan organik menjadi karbon aktif, gas, dan bahan padat berupa uap dan aerosol. Gas ini merupakan senyawa hidrokarbon yang dapat terkondensasi menjadi zat cair, stabil pada suhu kamar, dan dikenal sebagai biofuel atau bio oil. Faktor atau kondisi yang mempengaruhi proses pirolisis adalah waktu, suhu, ukuran partikel dan berat partikel[7].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pirolisis terhadap briket kayu kaliandra merah dengan perekat molase terhadap kualitas briket dan bagaimana pengaruh presentase perekat molase (tetes tebu) pada briket kayu kaliandra merah terhadap standart kualitas briket.

2. Metode

Proses pembuatan arang menggunakan metode pirolisis

1. Kayu kalindra di potong sekitar ukuran 5 cm lalu dibelah sehingga menjadi bagian yang kecil. Kemudian dijemur dibawah matahari untuk mengurangi kadar air yang terikat pada kayu kaliandra.
2. Potongan kayu kaliandra kemudian ditimbang menggunakan neraca analitik.
3. Kayu kaliandra kemudian di pirolisis menggunakan tungku pemanas/*furnace* dengan pada variasi suhu 300, 400, dan 500°C dengan laju kenaikan suhu 10 °C/menit selama 60 menit.
4. Arang kemudian didinginkan dengan menggunakan densikator untuk menghentikan proses pengarangan.
5. Arang hasil karbonisasi dihaluskan menggunakan mortar lalu dilakukan pengayakan dengan dengan ayakan, sehingga dihasilkan serbuk arang sesuai ukuran partikel arang yang diinginkan.

Proses Pembuatan Briket

1. Setelah arang hasil karbonisasi halus, kemudian kita akan mencampurkan antara arang dan perekat molase dengan perbandingan berikut:

Tabel 1. Perbandingan bahan dan perekat

Bahan dan perekat	Perbandingan arang dan molase (%)	
Arang	90	70
Molase	10	30

2. Setelah kedua di takar sesuai yang ada di tabel, kemudian aduk sampai merata .
3. Bahan siap untuk kita padatkan dengan cara pakai cetakan manual dengan berbentuk kotak ukuran 5 cm
4. Setelah bahan di cetak semua, briket kemudian kita jemur untuk mengurangi kadar air dan membuat tekstur briket benjadi keras dan padat
5. Setelah kering briket siap untuk di uji.

Prosedur Pengujian

1. Penetapan Kadar Air (ASTM D 5142 - 02) American Standard Testing and Material

Pengujiannya dengan cara satu gram (g) sampel dimasukkan pada alumunium foil yang sudah dibentuk cawan, kemudian dengan suhu 103 ± 2 ºC sampel dikeringkan dalam oven hingga kadar air mencapai berat konstan. Setelah sampel dioven maka didinginkan dengan cara dimasukkan dalam desikator dengan waktu 15 menit hingga suhu stabil kemudian ditimbang. [8].

Rumus perhitungan kadar air:

$$\text{KA}(\%) = \frac{\text{BB}-\text{BKT}}{\text{BKT}} \times 100\% \quad (1)$$

2. Penetapan Kerapatan (ASTM D 5142 –02) American Standard Testing and Material

Perbandingan antara volume dan berat briket arang dinyatakan dalam kerapatan, serta rumus perhitungan menggunakan[8].

$$\text{P} = \frac{M}{V} \quad (2)$$

3. Penetapan Kadar Abu (ASTM D 5142 –02) American Standard Testing and Material

Perlakuan pengujian kadar abu meletakkan satu gram sampel pada cawan porselin, selanjutnya dioven dengan alat muffle furnace pada suhu 600-900° C dengan waktu 5 jam atau 6 jam, lalu masuk alat desikator untuk didinginkan, ditimbang jika suhu stabil[8].

Rumus menghitung kadar abu:

$$\text{Kadar Abu}(\%) = \frac{Berat\ abu}{Berat\ Sampel} \div 100\% \quad (3)$$

4. Penetapan Nilai Kalor (ASTM D 5142 –02) American Standard Testing and Material

Perlakuan untuk menentukan nilai kalor yaitu dengan memasukkan satu gram sampel ke dalam cawan silika, memasukkannya ke dalam tabung *Bomb Calorimeter*. Pengukuran dengan menggunakan alat *perioxide bomb calorimeter* manual. Perhitungan berdasar pada jumlah kalor yang terlepas sama dengan jumlah kalor yang diserap, dan mengunakan satuan kal/gram dengan persamaan rumus[8]:

$$\text{Nilai Kalor} = \frac{w \times (T_2 - T_1)}{A} \text{B}_1 + \text{B}_2 \quad (4)$$

5. Penetapan Zat Terbang (ASTM D 5142 – 02) American Standard Testing and Material

Perlakuan pengujian kadar zat terbang meletakkan satu gram sampel pada cawan porselin, memasukkan sampel pada alat muffle furnace yang suhunya sudah diatur 950±20o C dengan waktu 7 menit, setelah itu dimasukkan pada alat, timbang jika suhu stabil. Rumus perhitungan zat terbang[8]:

$$\text{Zat Terbang} = \frac{\text{B}-\text{C}}{\text{W}} \times 100\% \quad (5)$$

6. Kadar Karbon Terikat (ASTM D 5142 – 02*)* American Standard Testing and Material

Perhitungan setelah mendapat hasil kadar air, kadar abu, dan zat terbang. Rumus perhitungan kadar karbon terikat[9]:

$$\text{Karbon T} = 100\% - (\text{Kadar Air} + \text{Kadar Abu} + \text{Kadar Zat Terbang}) \quad (6)$$

Matriks Penelitian

Matriks penelitian yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 6 sampel penelitian. Mengunakan arang hasil karbonisasi dengan variasi suhu 300°C,400°C dan 500°C dengan lama waktu karbonisasi 60 menit. Pada proses pembriketan akan menggunakan 2 varisasi perekat yaitu 90:10 dan 70:30.

Tabel 2. Matriks Penelitian

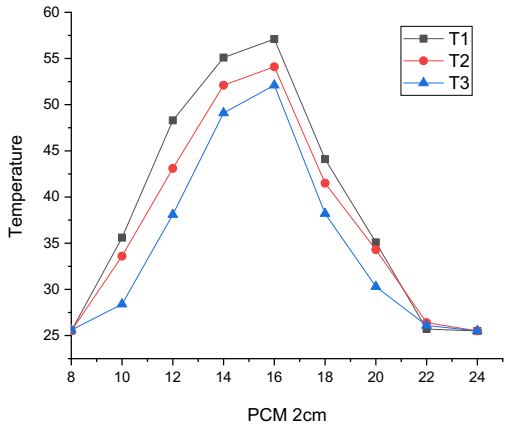
Vaiasi Perekat (%)	Waktu karbonisasai 60 menit	Waktu karbonisasai 60 menit	Waktu karbonisasai 60 menit
	300°C	400°C	500°C
90:10	A1	A2	A3
70:30	B1	B2	B3

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian pada dinding beton dengan campuran PCM parafin dan aluminium setebal 2 cm menunjukkan penurunan temperatur yang cukup signifikan dibandingkan dinding tanpa PCM. Suhu rata-rata maksimum pada titik atas tercatat sebesar **49,5°C**, titik tengah **46,2°C**, dan titik bawah **44,0°C**. Penurunan suhu berkisar antara **18–22%** terhadap sampel kontrol.

Penurunan ini menunjukkan bahwa PCM mampu menyerap sebagian energi panas dari sumber radiasi dan menyimpannya dalam bentuk energi laten selama proses fasa padat–cair. Parafin yang digunakan sebagai bahan utama PCM memiliki titik leleh sekitar 55°C, sehingga pada suhu di bawah titik tersebut, parafin masih berwujud padat dan berfungsi sebagai penahan panas. Ketika suhu meningkat, sebagian energi digunakan untuk mengubah fasa parafin menjadi cair tanpa menaikkan temperatur permukaan secara drastis [2].

Kombinasi dengan serbuk aluminium juga berperan penting dalam mempercepat laju perpindahan kalor dari permukaan luar beton menuju lapisan PCM, sehingga penyerapan panas berlangsung lebih efisien. Hasil ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Hasan et al. [3], yang menyatakan bahwa penambahan material logam konduktif ke dalam PCM dapat meningkatkan laju penyerapan kalor secara signifikan.



Gambar 1. Pengujian pada Ukuran PCM 2 cm

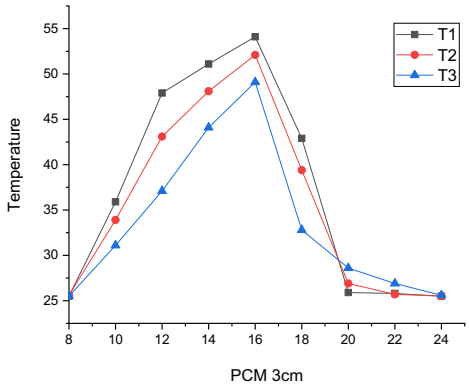
3.1. Hasil Pengujian Dinding dengan PCM Parafin-Aluminium Ketebalan 3 cm

Sampel dinding dengan PCM setebal 3 cm menunjukkan performa termal yang lebih baik dibandingkan variasi 2 cm. Suhu maksimum pada titik atas mencapai 46,3°C, titik tengah 43,8°C, dan titik bawah 41,5°C. Rata-rata penurunan suhu mencapai 24,6% dibandingkan dengan dinding tanpa PCM.

Lapisan PCM yang lebih tebal memungkinkan kapasitas penyimpanan energi laten meningkat, sehingga mampu menahan panas lebih lama. Selama proses pemanasan, PCM pada ketebalan ini menyerap kalor lebih banyak sebelum

mencapai titik leleh total, sehingga fluktuasi temperatur menjadi lebih terkendali. Setelah fase cair tercapai, PCM tetap menyimpan energi tanpa menaikkan suhu permukaan beton secara signifikan [4].

Namun demikian, ketebalan PCM yang terlalu besar juga berpotensi memperlambat laju transfer panas dari lapisan luar ke dalam, yang pada akhirnya dapat menurunkan kecepatan respon termal sistem. Oleh karena itu, meskipun lapisan 3 cm memberikan penurunan suhu lebih baik daripada 2 cm, efisiensi transfer panas masih perlu dikaji lebih lanjut.



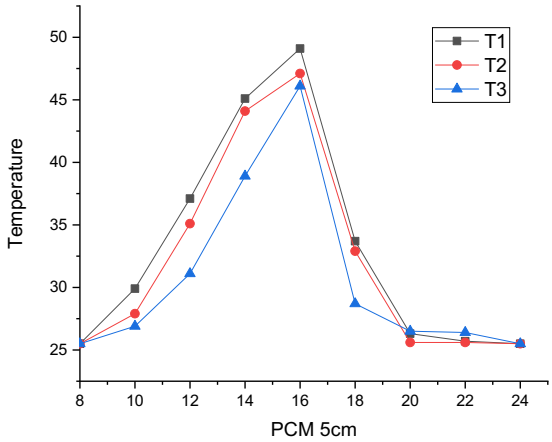
Gambar 2. Pengujian pada Ukuran PCM 3 cm

3.2. Hasil Pengujian Dinding dengan PCM Parafin-Aluminium Ketebalan 5 cm

Pada variasi PCM setebal 5 cm, penurunan temperatur lebih signifikan terjadi dibandingkan seluruh variasi sebelumnya. Suhu maksimum pada titik atas turun hingga 44,8°C, titik tengah 41,0°C, dan titik bawah 39,8°C. Nilai penurunan rata-rata mencapai 26,8% di titik atas, 22,9% di titik tengah, dan 19,2% di titik bawah.

Ketebalan 5 cm memungkinkan PCM menyerap lebih banyak energi panas sebelum seluruh material mengalami perubahan fasa, sehingga temperatur permukaan dapat dipertahankan lebih stabil. Aluminium yang bercampur dalam PCM berperan sebagai jembatan termal yang mempercepat penyerapan energi dari beton ke parafin. Hasil ini sejalan dengan penelitian Memon et al. [5], yang menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas termal PCM mampu mempercepat distribusi energi panas dan memperbaiki kestabilan suhu bangunan.

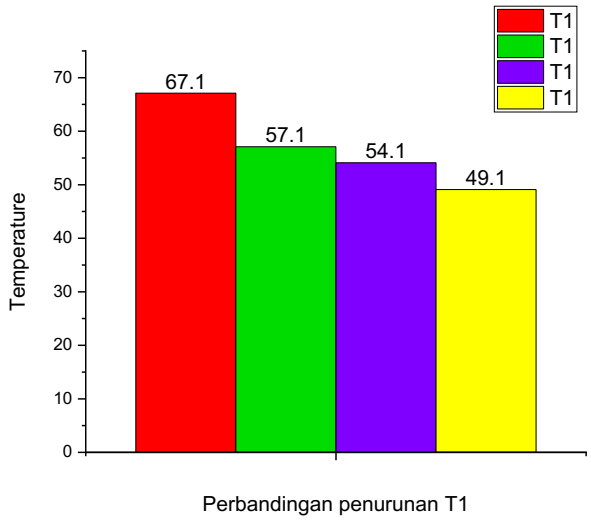
Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa lapisan PCM 5 cm merupakan variasi paling efisien dalam menyerap dan menyimpan panas pada dinding beton. Namun, efektivitas ini juga harus mempertimbangkan faktor berat jenis dan biaya material, karena ketebalan yang berlebihan dapat meningkatkan massa dinding secara signifikan.



Gambar 3. Pengujian pada Ukuran PCM 5 cm

3.3. Analisis Perbandingan Penyerapan Kalor

Perbandingan antara seluruh variasi sampel menunjukkan tren penurunan suhu seiring dengan bertambahnya ketebalan PCM. Dinding tanpa PCM mengalami kenaikan suhu tertinggi, sedangkan dinding dengan PCM 5 cm memiliki kemampuan terbaik dalam meredam kenaikan temperatur. Grafik perbandingan keseluruhan menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan PCM, semakin kecil kenaikan suhu yang terjadi selama proses pemanasan 16 jam [6].



Gambar 4. Perbandingan Temperatur titik T1 (temperatur atas)

Fenomena ini sesuai dengan teori penyimpanan energi laten, di mana semakin besar volume PCM, semakin tinggi kapasitas energi yang dapat diserap tanpa peningkatan temperatur signifikan. Kombinasi parafin dan aluminium terbukti efektif memperbaiki kelemahan PCM murni yang memiliki konduktivitas rendah. Aluminium berfungsi sebagai konduktor panas internal, mempercepat perpindahan kalor menuju inti PCM.

Secara keseluruhan, penerapan PCM parafin-aluminium dalam dinding beton memberikan kontribusi besar terhadap pengendalian suhu bangunan, khususnya di wilayah tropis. Hasil penelitian ini memperkuat temuan-temuan sebelumnya dan memberikan bukti empiris bahwa teknologi PCM dapat diimplementasikan sebagai alternatif material bangunan hemat energi.

3.4. Diskusi Umum

Hasil penelitian menunjukkan hubungan langsung antara ketebalan PCM dan penurunan temperatur permukaan dinding. Mekanisme yang terjadi adalah proses penyerapan energi panas oleh parafin selama perubahan fasa padat ke cair. Energi panas yang seharusnya menaikkan suhu beton justru tersimpan dalam bentuk energi laten di dalam PCM. Ketika sumber panas dihentikan, PCM secara perlahan melepaskan energi tersebut, sehingga suhu permukaan tetap stabil lebih lama.

Penerapan kombinasi PCM dan aluminium ini dapat dianggap sebagai inovasi material konstruksi yang berorientasi pada konservasi energi. Material ini memiliki potensi besar diterapkan pada dinding bangunan tropis, atap rumah, serta elemen struktural lain yang sering terpapar radiasi matahari langsung. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi teoritis terhadap pengembangan ilmu perpindahan panas, tetapi juga aplikatif terhadap desain bangunan berkelanjutan [7].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental, penggunaan PCM berbasis parafin dan aluminium pada dinding beton mampu menurunkan temperatur permukaan dibandingkan dinding beton tanpa PCM. Penurunan temperatur terjadi karena PCM menyerap dan menyimpan energi panas selama proses perubahan fasa, sedangkan aluminium membantu meningkatkan perpindahan kalor ke lapisan PCM sehingga proses penyerapan panas menjadi lebih efektif. Variasi ketebalan PCM memberikan pengaruh terhadap kemampuan termal dinding beton. Sampel dengan ketebalan PCM 2 cm menunjukkan penurunan temperatur sebesar 18–22%, sedangkan PCM 3 cm menghasilkan rata-rata penurunan temperatur sebesar 24,6%. Hasil terbaik diperoleh pada variasi PCM 5 cm dengan penurunan temperatur mencapai 26,8% pada titik atas, 22,9% pada titik tengah, dan 19,2% pada titik bawah. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan PCM meningkatkan kemampuan dinding dalam meredam kenaikan temperatur selama proses pemanasan. Dalam kondisi pengujian laboratorium menggunakan sumber panas lampu 200 watt selama 16 jam, kombinasi PCM parafin dan aluminium menunjukkan potensi sebagai material pendukung pengendalian temperatur pasif pada bangunan. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa PCM 5 cm merupakan variasi yang memberikan performa termal paling baik dibandingkan variasi lainnya pada kondisi pengujian yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bassiouny R, Ali MRO, Noureldeen ESH. Modeling the thermal behavior of Egyptian performance masonry red brick filled with material of low thermal conductivity. *J Build Eng.* 2016;5:158–164. doi:10.1016/j.jobe.2015.12.002.
2. Naik TR. Sustainability of Concrete Construction. *Pract Period Struct Des Constr.* 2008;13(2):98–103. doi:10.1061/(asce)1084-0680(2008)13:2(98).
3. Khairuzzaman MQ. Statistik Indonesia 2016. *Badan Pusat Statistik (BPS)*. Jakarta; 2016.
4. Suntoro KA, Darmawan RS. Perhitungan Beban Pendinginan Pada Ruangan di Perkantoran PT Indonesia Power UPJP Pesanggaran Bali. *J Tek Mesin.* 2018;17(1):19–30.
5. Mahlia TMI, Taufiq BN, Ismail H, Masjuki HH. Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy Build.* 2007;39(2):182–187. doi:10.1016/j.enbuild.2006.06.002.
6. Mei J, Xia X. Energy-efficient predictive control of indoor thermal comfort and air quality in a direct expansion air conditioning system. *Appl Energy.* 2017;195:439–452. doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.076.
7. Hasan A, Banerjee R, Reddy BVV. Thermal performance enhancement of buildings using phase change materials: A review. *Energy Build.* 2018;158:454–480. doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.033.
8. Memon SA, Cui H, Lo TY, Barbhuiya S. Development of form-stable composite phase change material by incorporation of dodecanol into ground granulated blast furnace slag. *Energy Build.* 2015;87:238–245. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.049.
9. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev.* 2009;13(2):318–345. doi:10.1016/j.rser.2007.10.005.
10. Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Sol Energy.* 1983;30(4):313–332. doi:10.1016/0038-092X(83)90186-X.