

PENGUKURAN RESISTANSI TERMAL BAHAN BANGUNAN DENGAN METODE ALIRAN KALOR DALAM LINGKUNGAN TERKONDISI
Measurement Of Thermal Resistance Of Building Materials
By The Method Of Heat Flow In An Environment Conditioned

Fefen Suhedi

Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Kabupaten Bandung 40393
E-mail : fefen.s@puskim.pu.go.id

Diterima : 17 Juni 2014; Disetujui : 04 September 2014

Abstrak

Data sifat termal bahan bangunan diperlukan dalam perancangan maupun evaluasi kondisi eksisting bangunan gedung yang terkait dengan kenyamanan termal dan energi bangunan. Resistansi termal, konduktansi termal, dan konduktivitas termal adalah diantara parameter-parameter untuk menyatakan sifat termal bahan. Salah satu metode untuk menentukan nilai resistansi termal bahan bangunan adalah ASTM C1155 yang menggunakan metode aliran kalor (heat flux) dengan pengambilan data secara in situ untuk mengevaluasi resistansi termal bahan. Kajian ini merupakan studi awal untuk menjajaki kemungkinan penggunaan instrumen pengukuran insitu dalam skala laboratorium. Pengukuran dilakukan dengan prinsip aliran kalor tetapi dilakukan di lingkungan yang terkontrol. Sebuah ruang pengukuran yang terkondisi telah dibuat yang terdiri dari kotak panas, kotak sampel, dan kotak dingin. Dua buah pemanas elektrik 500W digunakan untuk memanaskan udara di kotak panas, sedangkan udara di kotak dingin didinginkan menggunakan mesin pengondisi udara berkapasitas 5000 kBTU/jam. Sampel yang akan diukur diletakkan pada kotak sampel yang memisahkan kotak panas dan kotak dingin. Laju aliran kalor dan perbedaan temperatur permukaan sampel diukur menggunakan sistem instrumen TRSYS01 pada dua lokasi ukur. Eksperimen pengukuran resistansi termal dilakukan terhadap sampel fiber semen 6 mm, papan gypsum tipe standar tebal 9 mm, dinding bata merah tebal 100 mm, dan dinding bata ringan tebal 100 mm. Perhitungan resistansi termal dilakukan dengan metode penjumlahan sesuai ASTM C1155. Hasil pengukuran selama 24 jam diperoleh nilai perkiraan resistansi termal fiber semen adalah 0,029 m².K/W, papan gypsum 0,068 m².K/W, bata merah 0,246 m².K/W, dan bata ringan 0,583 m².K/W memenuhi persyaratan convergence ratio (CR) < 0,10 dan koefisien variansi V(R_e) <10%.

Kata kunci : Resistansi termal, transmitansi termal, konduktivitas termal, aliran kalor, bahan bangunan

Abstract

The data thermal properties of building materials needed in the design and evaluation of the existing condition of the building related to thermal comfort and energy building. Thermal resistance, thermal conductance, and thermal conductivity are among the parameters to express the thermal properties of materials. One method for determining the value of the thermal resistance of building materials is ASTM C1155 that using heat flow (heat flux) with insitu data collection to evaluate the thermal resistance of the material. This study is preliminary study to explore the possibility of the use of the instrument insitu measurements in the laboratory scale. Measurements were made with the principle of heat flow but done in a controlled environment. A measurement of the conditioned space has been created that consists of a hot box, box of samples, and a cold box. Two 500W electric heater used to heat the air in a hot box, while the air in the cold box is cooled using air conditioner engine capacity of 5000 KBTU / h. The sample to be measured is placed on a separate sample box devided box hot and cold. The rate of heat flow and temperature difference sample surface was measured using an instrument system TRSYS01 at two measuring sites. Thermal resistance measurements performed experiments on samples of 6 mm fiber cement, gypsum board standard type 9 mm thick, thick red brick walls of 100 mm, and light brick wall thickness of 100 mm. Calculations performed by the thermal resistance per ASTM C1155 summation method. The measurement results obtained during the 24 hours estimated value of thermal resistance of fiber cement is 0.029 m².K / W, 0.068 gypsum board m².K / W, red brick 0.246 m².K / W, and 0.583 light brick m².K / W meets the requirements of convergence ratio (CR) <0.10 and a coefficient of variance V (Re) <10%.

Keywords : Thermal resistance, thermal transmittance, thermal conductivity, heat flow, building materials

PENDAHULUAN

Energi menjadi salah satu parameter penting dalam penilaian “bangunan hijau” (*green building*). Sistem penilaian bangunan hijau yang ada di dunia seperti LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) di Amerika, BREEM (*Building Research Establishment's Environmental Assessment Method*) di Inggris, CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*) di Jepang, GBTool (dikembangkan dengan melibatkan lebih dari 25 negara) memasukkan aspek energi bangunan sebagai salah satu indikator bangunan hijau [1, 2]. Prinsip penilaian energi bangunan adalah meminimalkan penggunaan energi yang tidak terbarukan dan memaksimalkan penggunaan sumber-sumber energi baru dan terbarukan.

Tingkat konsumsi energi terbesar pada bangunan gedung berasal dari pengondisian udara. Pengurangan beban termal yang diterima bangunan melalui perancangan selubung bangunan yang baik menjadi strategi dasar untuk mengurangi konsumsi energi bangunan. SNI 6389:2011 [3] mendefinisikan selubung bangunan sebagai elemen bangunan yang membungkus bangunan gedung, yaitu dinding dan atap dimana sebagian besar energi termal berpindah melalui elemen tersebut. Informasi mengenai karakteristik daya hantar panas suatu material bangunan yang akan digunakan sebagai selubung bangunan (bagian terluar dari sebuah bangunan seperti atap dan dinding) diperlukan dalam proses perancangan bangunan. Karakteristik daya hantar panas selubung bangunan diperlukan dalam perhitungan beban termal bangunan untuk menentukan kapasitas beban pendinginan pengondisi udara (*air conditioner*). Beban pendinginan akibat transmisi panas dari luar melalui selubung bangunan sangat besar. Untuk gedung kantor satu lantai di Indonesia, saat terjadi beban puncak, beban pendinginan dapat mencapai 40% hingga 50% tergantung dari rasio bidang transparan (kaca) terhadap luas selubung bangunan keseluruhan. Karakteristik daya hantar panas untuk keperluan ini dinyatakan sebagai nilai perpindahan termal menyeluruh (*overall thermal transfer value (OTTV)*) dan nilai perpindahan termal atap (*roof thermal transfer value (RTTV)*) yang dinyatakan dalam watt/m². SNI 6389:2011 Konservasi energi selubung bangunan pada bangunan gedung mensyaratkan nilai OTTV dan RTTV tidak lebih dari 35 watt/m².

Perhitungan OTTV dan RTTV melibatkan data nilai transmitansi termal, nilai U (*U-value*). Transmitansi termal untuk dinding yang tidak transparan dihitung mengikuti rumus $U = 1/R_{total}$ dengan R_{total} = resistansi termal total = $\sum_{i=1} R_i$. Resistansi termal

terdiri dari resistansi termal lapisan udara luar, resistansi termal bahan, resistansi termal rongga udara, dan resistansi termal lapisan udara permukaan. Untuk memudahkan dalam perhitungan, nilai R lapisan udara dan rongga udara sudah diberikan dalam SNI 6389:2011. Maka, tersisa data resistansi termal bahan untuk dicari agar diperoleh nilai U. Nilai R untuk bahan-bahan yang sudah umum digunakan dapat diperoleh dari literatur, namun untuk bahan-bahan yang relatif baru nilai R-nya mungkin belum tersedia dalam basis data.

Sifat termal bahan dapat diperoleh melalui pengukuran, baik di lapangan maupun di laboratorium. Salah satu metode untuk menentukan nilai resistansi termal bahan bangunan adalah ASTM C1155 yang menggunakan metode aliran kalor (*heat flux*) dengan pengambilan data secara insitu untuk mengevaluasi resistansi termal bahan. Salah satu kekurangan metode pengukuran secara insitu adalah waktu pengumpulan data yang relatif lama hingga berhari-hari bahkan berminggu-minggu untuk mendapatkan data yang baik [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Hal ini karena pengukuran terpengaruh oleh perubahan kondisi lingkungan yang berfluktuasi secara harian.

Kajian ini merupakan studi awal untuk menjajaki kemungkinan penggunaan instrumen pengukuran insitu dalam skala laboratorium. Pengukuran dilakukan dengan prinsip aliran kalor tetapi dilakukan di lingkungan yang terkontrol. Dengan menciptakan kondisi lingkungan pengukuran yang terkendali diharapkan diperoleh data pengukuran yang cukup baik dalam waktu yang lebih pendek dibandingkan pengukuran secara insitu.

METODE

Prinsip penentuan resistansi termal suatu bahan dengan metode aliran kalor adalah dengan mengukur jumlah kalor yang mengalir melalui bahan tersebut pada suatu kondisi beda temperatur permukaan antara kedua sisinya. Aliran kalor pada selubung bangunan terjadi apabila ada perbedaan temperatur antara permukaan luar dan permukaan dalam. Semakin tinggi beda temperatur yang terjadi semakin besar aliran kalor yang terjadi. Pada pengukuran secara insitu, temperatur permukaan luar akan berubah-ubah mengikuti perubahan temperatur udara luar. Untuk daerah beriklim tropis, perbedaan temperatur luar-dalam yang terjadi tidak sebesar daerah dengan empat musim.

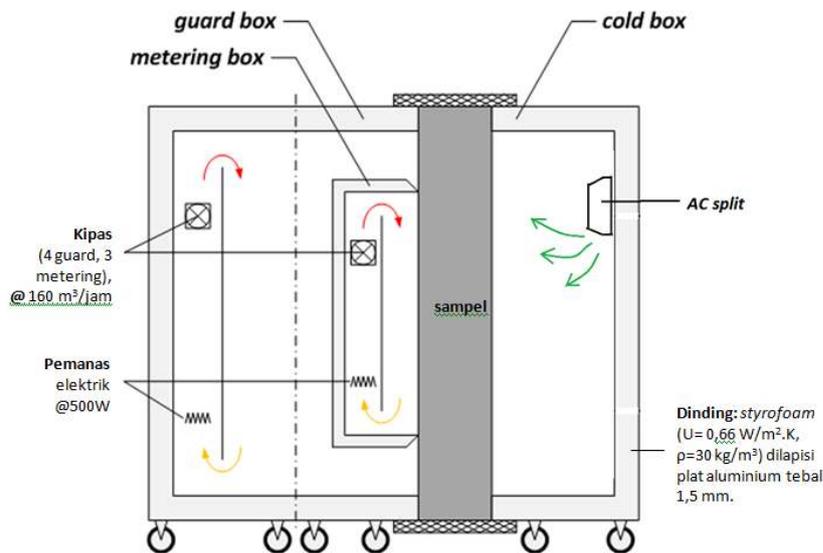
ASTM C1155 *Standard practise for determining thermal resistance of building envelope from the insitu data* adalah metode yang digunakan untuk

menentukan resistansi termal dari suatu material, baik terdiri dari material tunggal maupun material komposit, yang sudah terpasang di lapangan. Standar ini memberikan cara perhitungan resistansi termal berdasarkan hasil pengukuran aliran kalor (*heat flux*) dan temperatur permukaan selubung bangunan dalam keadaan operasional (*in service condition*). Pembuatan lingkungan pengukuran yang terkondisi ditujukan untuk menciptakan perbedaan temperatur yang cukup besar dan relatif tetap dalam jangka waktu yang diperlukan untuk memperoleh data yang cukup.

Peralatan

Pengondisi lingkungan pengukuran menggunakan sebuah kotak yang terdiri dari kotak panas, kotak dingin, dan kotak tempat sampel. Kotak pengukuran yang digunakan secara skematik diperlihatkan pada Gambar 1. Kotak dingin (*cold box*) dilengkapi mesin pengondisi udara (*air conditioner (AC)*) untuk menciptakan udara dingin. Mesin AC yang digunakan berkapasitas

pendinginan 5000 kBTu/jam, daya input 1465 W, dan laju aliran udara indoor unit 5,5 CFM (194 m³/menit). Kotak panas menggunakan dua buah pemanas elektrik yang ditempatkan di dalam kotak pengukuran dan kotak penjaga (*guarded box*) masing-masing berkapasitas 500 watt. Distribusi udara panas di dalam kotak dibantu oleh kipas angin berkapasitas 160 m³/jam yang dipasang sebanyak empat buah di kotak penjaga, dan tiga buah di kotak pengukuran. Ukuran dinding sampel di area pengukuran adalah 1 m x 1 m. Perangkat kotak pengukuran dilengkapi dengan *temperature controller* tipe ON-OFF yang akan mematikan dan menghidupkan mesin pemanas ataupun pendingin ketika temperatur udara di dalam kotak telah mencapai *setting point* yang ditetapkan. *Controller* dihubungkan dengan termokopel yang memonitor temperatur udara di dalam kotak sebagai data masukan untuk *controller*. Kotak panas dan kotak dingin masing-masing dilengkapi dengan dua buah *controller*.

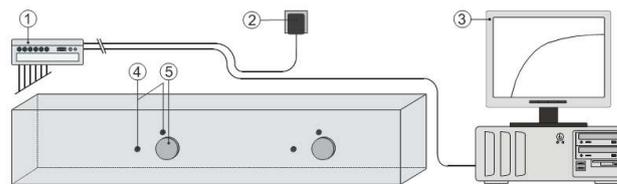


Gambar 1 Skema Perangkat Kotak Pengukuran Resistansi Termal Pusat Litbang Permukiman

Instrumen utama yang digunakan untuk pengambilan data laju aliran kalor dan temperatur permukaan adalah TRSYS01 buatan Hukseflux®. TRSYS01 adalah sistem pengukuran untuk menganalisis resistansi termal dan transmitansi termal komponen bangunan dengan metode in-situ. TRSYS01 sesuai untuk penggunaan pengukuran dengan metode ISO 9869 dan ASTM C1155/ C1046. TRSYS01 yang digunakan terdiri dari dua buah sensor aliran kalor (*heat flux sensor*) tipe HFP01 dan dua pasang *matched thermocouples* untuk pengukuran temperatur permukaan. Sensor-sensor yang digunakan telah dikalibrasi oleh

pabrik. Susunan peralatan pada pengukuran menggunakan TRSYS01 diperlihatkan pada Gambar 2. Penempatan sensor HFP01 dan *thermocouple* pada sampel yang diuji dapat dilihat pada Gambar 3.

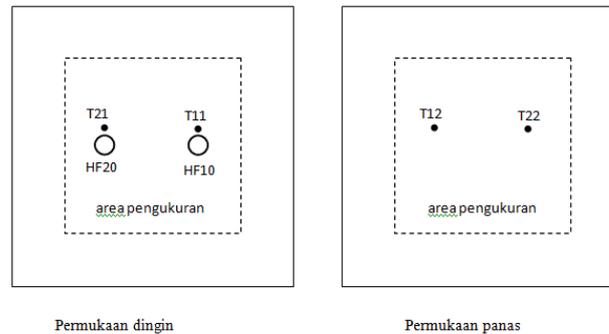
Data aliran kalor (W/m²), beda temperatur (°C), dan temperatur salah satu permukaan (°C) direkam setiap 10 menit ke dalam *data logger*. *Data logger* yang digunakan adalah Campbell Scientific® tipe CR100. Data dapat dibaca dan diunduh dengan menyambungkan MCU ke *Personal Computer (PC)* yang sudah diinstal perangkat lunak LoggerNet versi 4.1.



Keterangan:

① Measurement Control Unit (MCU), ② Power adapter, ③ Personal Computer untuk membaca dan mengunduh data pengukuran, ④ Dua pasang matched thermocouples, ⑤ Dua buah sensor aliran kalor, heat flux plate type HFP01

Gambar 2 Susunan Peralatan Pada Pengukuran Menggunakan TRSYS01



Keterangan: ● = thermocouple, ○ = sensor heat flux

Gambar 3 Penempatan Sensor-Sensor Pada Pengukuran Resistansi Termal

Bahan

Uji coba sistem pengukuran resistansi termal bahan bangunan dilakukan dengan mengukur resistansi termal beberapa bahan yang terdiri dari satu jenis bahan homogen. Bahan sampel yang akan diukur dibuat menjadi spesimen uji ukuran 1,60 m x 1,60 m. Bahan-bahan yang digunakan sebagai sampel pengukuran pada eksperimen ini adalah sebagai berikut :

- 1) Papan fiber semen rata, tebal 6 mm, 1.380 kg/m³.
- 2) Papan gypsum standar tebal 9 mm, 754 kg/m³.
- 3) Dinding pasangan bata merah tebal 10 cm (1.564 kg/m³), antar unit bata direkatkan menggunakan mortar instan dengan tebal aplikasi 10 mm.
- 4) Dinding pasangan bata beton ringan (*aerated concrete*) (575 kg/m³), antar unit bata direkatkan menggunakan mortar instan dengan tebal aplikasi 3 mm.

Setup Pengukuran

Pengukuran resistansi termal beberapa bahan bangunan telah dilaksanakan pada perangkat kotak pengukuran dengan metode pengukuran secara insitu. Pengaturan pengukuran resistansi termal yang dilaksanakan adalah sebagai berikut : set poin udara panas 35°C dengan *hysteresis* 3°C, artinya pemanas elektrik akan berhenti bekerja ketika temperatur udara mencapai 35°C dan akan menyala kembali ketika temperatur udara turun mencapai 32°C; sedangkan *controller* udara dingin diset pada 15°C dan *hysteresis* 3°C, yang berarti AC akan berhenti bekerja apabila temperatur udara

menunjukkan 15°C dan akan beroperasi apabila temperatur udara menunjukkan 18°C atau lebih. Data direkam setiap interval 10 menit.

Analisis

Estimasi nilai resistansi termal dihitung berdasarkan ASTM C1155 dengan teknik penjumlahan (*summation technique*). Perhitungan ini melibatkan data akumulasi aliran kalor dan perbedaan temperatur permukaan luar dan dalam selama pengukuran. Teknik perhitungan ini memerlukan perbedaan temperatur yang cukup besar dan temperatur yang relatif konstan pada salah satu permukaan untuk dapat mencapai konvergensi dengan cepat. Teknik perhitungan ini juga tidak memperhitungkan penyimpanan termal (*thermal storage*) oleh material sehingga peningkatan beda temperatur luar-dalam akan tampak secara gradual, terutama pada bahan-bahan yang massif. Resistansi termal untuk setiap interval pengukuran, dimulai sejak awal pengukuran, dihitung sesuai dengan rumus (1).

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta T_{sk}}{\sum_{k=1}^M q_k} \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- R_e = estimasi resistansi termal, m².K/W
- ΔT = selisih temperatur antara luar dan dalam, K
- q = aliran kalor (*heat flux*), W/m²
- k = 1, 2, 3,...

Pengukuran secara insitu dilakukan setidaknya tidak kurang dari 24 jam, karena 24 jam adalah lamanya siklus temperatur harian. Kecukupan data

yang diperoleh dievaluasi melalui nilai rasio konvergensi (*convergence ratio (CR)*). Interval pengukuran, *n*, dipilih untuk menghitung perbedaan nilai *R_e* yang sekarang dengan nilai *R_e* pada periode *n* sebelumnya. Periode *n* yang disarankan adalah 12 jam, namun boleh juga dicoba untuk interval 6 jam dan 48 jam. Data pengukuran dianggap cukup baik apabila rasio konvergensi yang dihitung sesuai rumus (2) bernilai kurang dari 0,10 selama tiga periode *n*. Selanjutnya, nilai *R_e* dengan rasio konvergensi yang baik tersebut digunakan sebagai nilai resistansi termal komponen bangunan yang sedang diukur.

$$CR_n = \frac{R_e(t) - R_e(t-n)}{R_e} \dots\dots\dots (2)$$

dimana *t* adalah waktu dinyatakan dalam jam, dan *n* adalah interval uji konvergensi (jam).

Pengukuran dilanjutkan selama dua atau tiga periode *n*, dimulai sejak kriteria konvergensi dicapai untuk memperoleh dua atau tiga nilai *R_e* yang independen. Selanjutnya dihitung koefisien variansi, *V(R_e)*, sesuai rumus (3). Apabila *V(R_e)* kurang dari 10% maka nilai resistansi termal rata-rata yang diperoleh dengan perhitungan metode ini dapat digunakan.

$$V(R_e) = [s(R_e) / \text{rerata } (R_e)] \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

dimana *s(R_e)* adalah simpangan baku, didasarkan pada perhitungan derajat kebebasan *N-1*, dan *N* adalah banyaknya nilai *R_e* yang diperoleh (*N* ≥ 3).

Nilai resistansi termal yang diperoleh dari dua set sensor yang telah memenuhi syarat dapat dipergunakan dalam analisis selanjutnya untuk memperoleh satu nilai resistansi termal yang mewakili keduanya. Nilai resistansi termal rata-rata yang diperoleh dari *N* set sensor dihitung sesuai persamaan (4).

$$R_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^N R_i} \dots\dots\dots (4)$$

Hasil perhitungan berlaku untuk kondisi temperatur permukaan sesuai keadaan pada saat pengukuran. Temperatur permukaan rata-rata, *T_e*, dihitung berdasarkan rumus (5). Temperatur permukaan rata-rata adalah rata-rata aritmatik dari dua temperatur permukaan bidang batas yang dibobotkan untuk memperhitungkan kondisi aliran kalor non-mantap (*non-steady state heat flux*).

$$T_e = (\sum_{k=1}^M \Delta T_k [T_{isk} - (1/2)(\Delta T_k)]) / \sum_{k=1}^M \Delta T_k \dots\dots\dots (5)$$

dengan *T_{is}* adalah temperatur permukaan dalam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rangkuman hasil pengukuran resistansi termal beberapa material yang diuji di perangkat kotak pengukuran diperlihatkan pada Tabel 1.

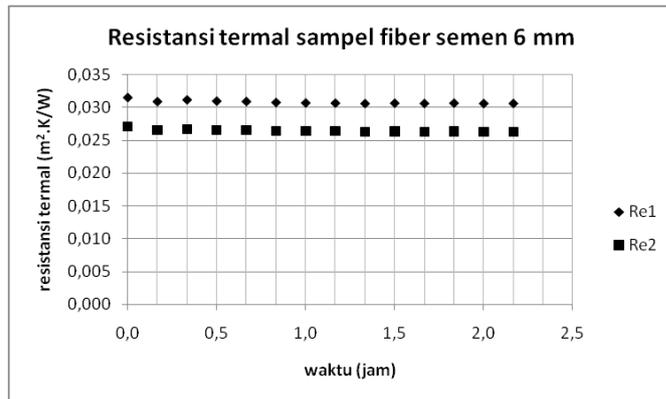
Tabel 1 Hasil Pengukuran Resistansi Termal Dengan Perangkat Kotak Pengukuran

| Parameter | Fiber Semen 6 mm | Gypsum Standar 9 mm | Bata Merah 100 mm | Bata Ringan 100 mm |
|---|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| Set point udara panas (°C) | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Set point udara dingin (°C) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Resistansi termal 1, <i>R_e</i> (m ² .K/W) | 0,031 | 0,061 | 0,245 | 0,619 |
| Resistansi termal 2, <i>R_e</i> (m ² .K/W) | 0,026 | 0,076 | 0,246 | 0,551 |
| Temperatur permukaan rata-rata 1, <i>T_e</i> (°C) | 24,28 | 24,20 | 24,75 | 24,46 |
| Temperatur permukaan rata-rata 2, <i>T_e</i> (°C) | 25,82 | 24,63 | 25,05 | 24,57 |
| Bulk density (kg/m ³) | 1.380 | 754 | 1.564 | 575 |

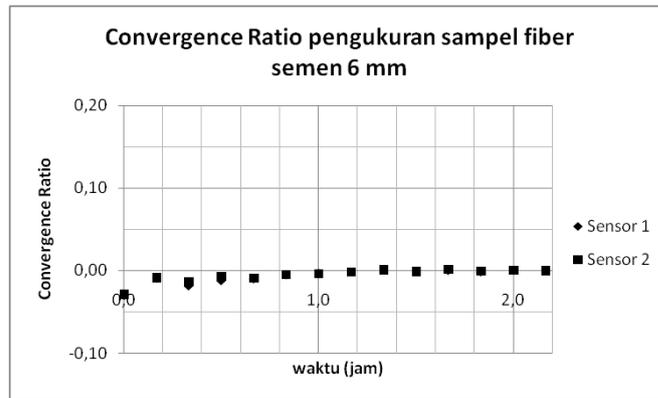
Papan Fiber Semen Tebal 6 mm

Pengukuran dilakukan selama periode 130 menit. Resistansi termal bahan yang dihitung berdasarkan persamaan (1) diperlihatkan pada Gambar 4. Kelompok sensor pertama menunjukkan perkiraan nilai resistansi termal, *R_{e1}*, sebesar 0,031 m².K/W sedangkan kelompok sensor kedua menghasilkan perkiraan nilai resistansi termal, *R_{e2}*, sebesar 0,026 m².K/W. Analisis rasio konvergensi, *CR*, dengan interval uji konvergensi, *n*, tiap interval 10 menit diperlihatkan pada Gambar 5. Nilai-nilai *CR* pada Gambar 5 menunjukkan bahwa harga estimasi resistansi termal yang diperoleh kedua kelompok

sensor dapat diterima karena *CR* lebih kecil dari 0,10 sejak awal data direkam. Data direkam setelah sistem kotak pengukuran mencapai kondisi mantap. Nilai koefisien variansi dihitung sesuai rumus (3). Kelompok sensor pertama dan kedua dengan masing-masing *N*=14 menghasilkan koefisien variansi yang sama yaitu 1%, lebih kecil dari 10%. Dengan demikian, nilai estimasi resistansi termal yang diperoleh dapat digunakan. Adapun temperatur rata-rata permukaan sebagaimana dihitung dengan rumus (5) diperoleh nilai 24,28°C untuk sensor pertama dan 25,42°C untuk sensor kedua.



Gambar 4 Hasil Estimasi Nilai R Sampel Fiber Semen Selama Pengukuran



Gambar 5 Convergence Ratio Pengukuran Sampel Papan Fiber Semen

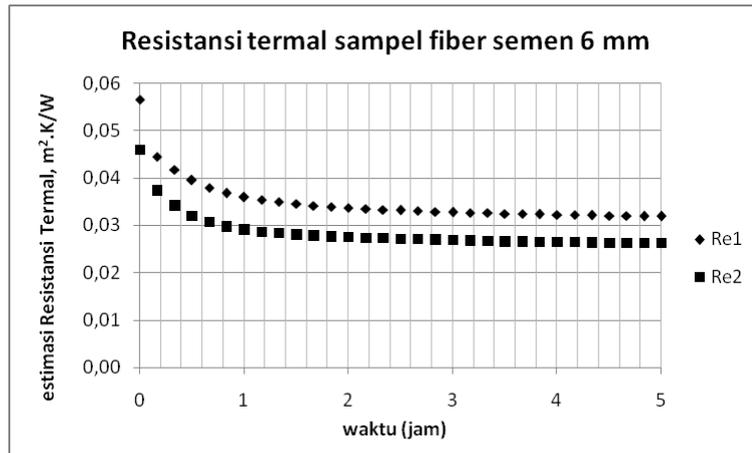
Pengukuran resistansi termal fiber semen dicoba diulang dengan pengaturan temperatur udara yang berbeda. Eksperimen kedua dilakukan dengan mengatur temperatur udara panas pada 50°C sedangkan udara dingin pada 15°C. Pengukuran dilangsungkan selama 5 jam dengan interval pengambilan data tiap 10 menit. Hasil pengukuran kedua untuk sampel fiber semen diperlihatkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Parameter-parameter yang terukur berdasarkan metode penjumlahan ASTM C1155 adalah sebagai berikut (nilai-nilai disampaikan secara berurutan untuk sensor pertama dan kedua): estimasi nilai resistansi termal, R_e , diperoleh 0,032 m².K/W dan 0,026 m².K/W dengan koefisien variansi, $V(R_e)$, masing-masing 3% untuk N=23 dan N=24. Nilai

resistansi yang konvergen ($CR < 0,10$) diperoleh setelah pengukuran berlangsung lebih dari satu jam. Temperatur permukaan rata-rata diperoleh 32,79°C dan 34,27°C.

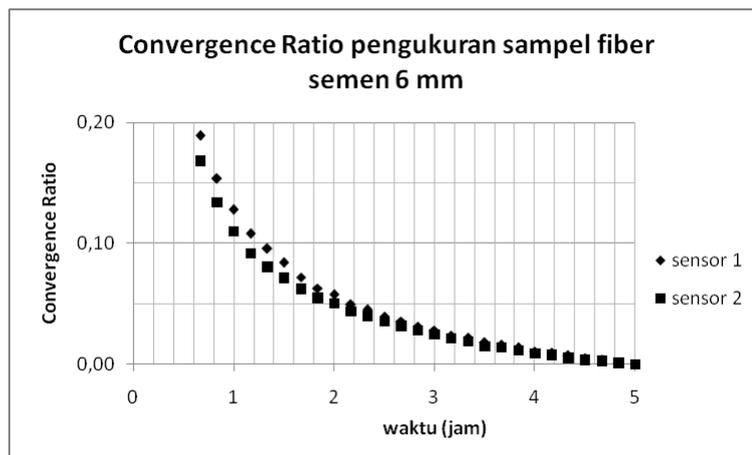
Hasil pengukuran pertama dan kedua untuk sampel fiber semen tebal 6 mm ditampilkan kembali pada Tabel 2. Berdasarkan data pada Tabel 1 diperlihatkan bahwa perubahan temperatur udara panas dari 35°C menjadi 50°C tidak mengubah hasil pengukuran. Dengan demikian, pengukuran resistansi termal pada perangkat kotak pengukuran dapat menggunakan pengaturan temperatur udara panas pada 35°C dan pengaturan udara dingin 15°C untuk mendapatkan data yang memadai.

Tabel 2 Hasil Pengukuran Resistansi Termal Papan Fiber Semen 6 mm

| Parameter | Pengaturan 1 | Pengaturan 2 |
|--|--------------|--------------|
| Temperatur udara panas (°C) | 35 | 50 |
| Temperatur udara dingin (°C) | 15 | 15 |
| Resistansi termal 1, R_e (m ² .K/W) | 0,031 | 0,032 |
| Resistansi termal 2, R_e (m ² .K/W) | 0,026 | 0,026 |
| Temperatur permukaan rata-rata 1, T_e (°C) | 24,28 | 32,79 |
| Temperatur permukaan rata-rata 2, T_e (°C) | 25,82 | 34,27 |



Gambar 6 Hasil Estimasi Nilai R Sampel Fiber Semen Selama Pengukuran

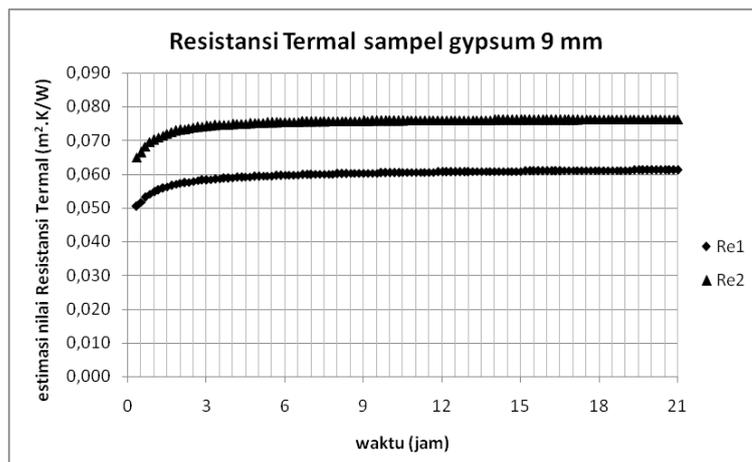


Gambar 7 Convergence Ratio Pengukuran Sampel Papan Fiber Semen

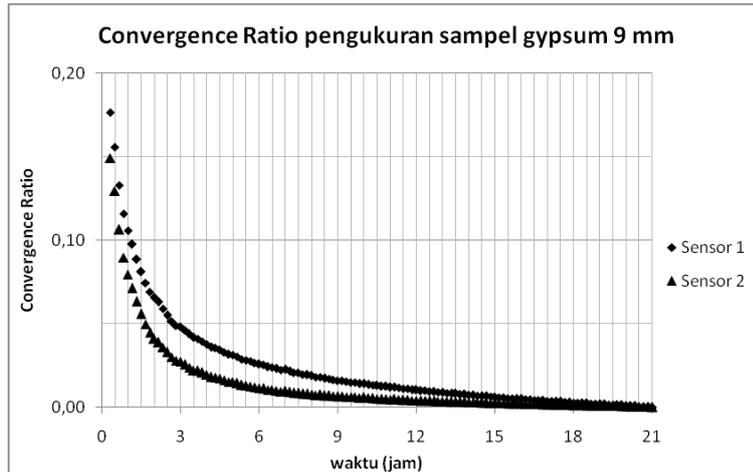
Papan Gypsum Tebal 9 mm

Pengukuran terhadap sampel gypsum dilaksanakan selama 21 jam 10 menit. Hasil perhitungan estimasi nilai resistansi termal sesuai rumus (4) untuk sampel papan gypsum setelah 21 jam pengukuran adalah menuju konvergen pada nilai $R_{e1} = 0,061 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ dan $R_{e2} = 0,076 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. Kelompok sensor pertama menunjukkan rasio

konvergensi dibawah 0,10 setelah 60 menit pengukuran, sedangkan kelompok sensor kedua mencapainya dalam 50 menit (lihat Gambar 8 dan Gambar 9). Koefisien variansi R_e , $V(R_e)$ yang diperoleh untuk kedua kelompok sensor adalah masing-masing 2% untuk $N=120$ dan $N=122$. Temperatur permukaan rata-rata mencapai $24,20^\circ\text{C}$ dan $24,63^\circ\text{C}$.



Gambar 8 Hasil Estimasi Nilai R Sampel Papan Gypsum Selama Pengukuran

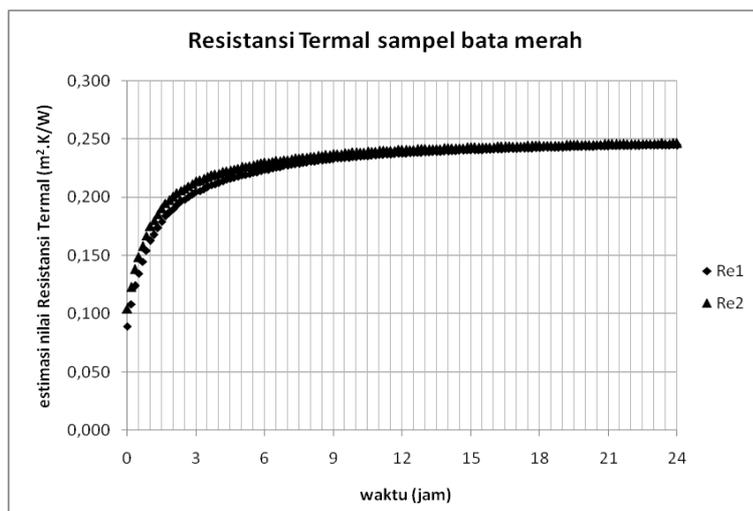


Gambar 9 Convergence Ratio Pengukuran Sampel Papan Gypsum

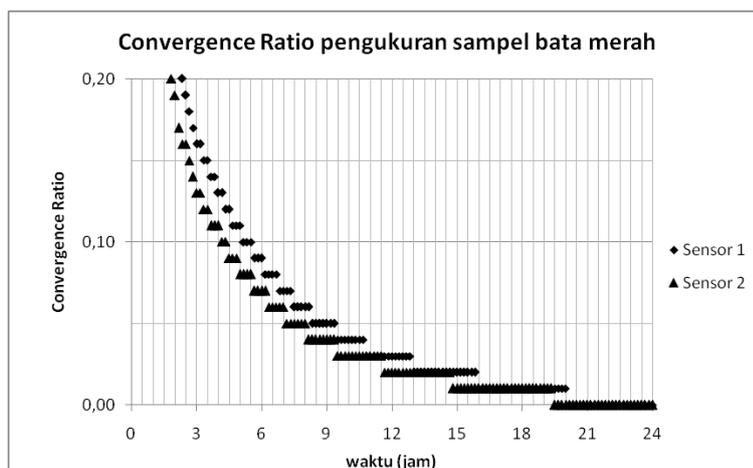
Bata Merah

Pengukuran terhadap sampel dinding bata merah dilaksanakan selama 24 jam. Kelompok sensor pertama menunjukkan perbedaan temperatur permukaan panas dan dingin mencapai rata-rata

11,07°C dengan aliran kalor rata-rata 45,20 W/m². Kelompok sensor kedua menunjukkan perbedaan temperatur permukaan rata-rata 10,84°C dengan aliran kalor rata-rata 43,99 W/m².



Gambar 10 Hasil Estimasi Nilai R Sampel Bata Merah Selama Pengukuran



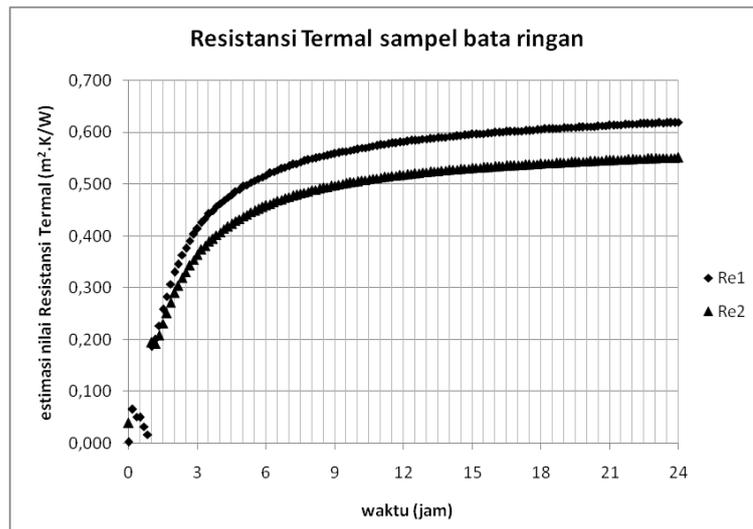
Gambar 11 Convergence Ratio Pengukuran Sampel Bata Merah

Estimasi nilai resistansi termal sesuai rumus (4) untuk sampel bata merah menuju konvergen pada nilai 0,245 m².K/W dan 0,246 m².K/W sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10. Nilai rasio konvergensi dibawah 0,10 dicapai oleh kelompok sensor pertama setelah pengukuran dilangsungkan selama 5 jam sedangkan kelompok sensor kedua mencapainya setelah 4 jam pengukuran (lihat Gambar 11), nilai koefisien variansi V(R_e) masing-masing adalah 3% dengan

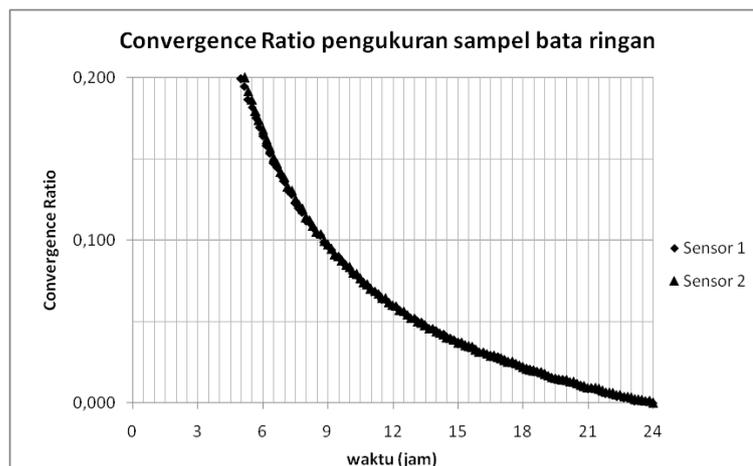
N=114 dan N=120. Adapun temperatur permukaan rata-rata yang dicapai adalah 24,75°C dan 25,05°C.

Bata Ringan (Aerated Concrete)

Pengukuran terhadap sampel dinding bata ringan dilaksanakan selama 24 jam. Kelompok sensor pertama menunjukkan perbedaan temperatur permukaan panas dan dingin mencapai rata-rata 13,96°C dengan aliran kalor rata-rata 22,534 W/m². Kelompok sensor kedua menunjukkan perbedaan temperatur permukaan rata-rata 12,99 °C dengan aliran kalor rata-rata 23,5 W/m².



Gambar 12 Hasil Estimasi Nilai R Sampel Bata Ringan Selama Pengukuran



Gambar 13 Convergence Ratio Pengukuran Sampel Bata Ringan

Estimasi nilai resistansi termal sesuai rumus (4) untuk sampel bata merah menuju konvergen pada nilai 0,619 m².K/W dan 0,551 m².K/W sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12. Nilai rasio konvergensi dibawah 0,10 dicapai oleh kelompok sensor pertama dan kedua setelah pengukuran dilangsungkan selama 8,5 jam (lihat Gambar 13). Nilai koefisien variansi V(R_e) masing-masing adalah 3% untuk masing-masing N=94.

Adapun temperatur permukaan rata-rata yang dicapai adalah 24,46°C dan 25,57°C.

Pembahasan

Pengukuran resistansi termal telah dilakukan dengan metode aliran kalor menggunakan kotak pengukuran sebagai lingkungan pengukuran dan TRSYS01 sebagai pengumpul data. Data yang direkam adalah data aliran kalor (*heat flux*), temperatur salah satu permukaan, dan perbedaan

temperatur antara permukaan panas dan dingin. Data-data tersebut selanjutnya diolah untuk memperoleh nilai resistansi termal. Nilai resistansi termal dari metode kotak pengukuran modifikasi ini selanjutnya dapat dibandingkan dengan hasil pengukuran lainnya setelah dikonversi menjadi nilai konduktivitas termal.

Periode Pengukuran Resistansi Termal Dalam Lingkungan Terkondisi

Waktu yang diperlukan untuk memperoleh data yang cukup baik pada pengukuran resistansi termal dengan metode *heat flux* yang dilakukan dalam lingkungan pengujian dilakukan di kotak pengukuran lebih singkat daripada pengukuran secara insitu. Periode pengukuran diukur dari lamanya waktu yang diperlukan untuk memperoleh nilai *convergence ratio (CR)* di bawah 0,10. Pengukuran secara in situ memerlukan waktu minimal 12 x n jam untuk dapat memeriksa kualitas data. Pengukuran di kotak pengukuran dapat mencapai nilai CR yang disyaratkan kurang dari 12 jam. Hal ini disebabkan kondisi lingkungan pengukuran di kotak pengukuran lebih stabil dibandingkan pengukuran di lapangan. Lamanya waktu yang diperlukan untuk mencapai CR < 0,10 dipengaruhi oleh kemampuan material dalam menghantarkan kalor.

Akurasi

Pengukuran resistansi termal beberapa bahan dengan metode insitu dalam lingkungan terkondisi telah dilaksanakan. Nilai resistansi termal yang diperoleh dari dua set sensor yang telah memenuhi syarat dapat dipergunakan dalam analisis selanjutnya untuk memperoleh satu nilai resistansi termal yang mewakili keduanya yang dinyatakan sebagai nilai R_m .

Nilai konduktivitas termal bahan diperoleh dari hasil bagi antara tebal bahan dengan resistansi termalnya. Nilai konduktivitas termal bahan-bahan yang telah diukur disampaikan kembali pada Tabel 3. Hasil pengukuran akan dibandingkan dengan nilai acuan untuk mengevaluasi akurasi. Akurasi menunjukkan seberapa dekat suatu hasil pengukuran dengan “nilai yang benar”. Tabel 3 memperlihatkan bahwa nilai konduktivitas termal yang diperoleh dari pengukuran di kotak pengukuran lebih mendekati nilai “referensi”. Nilai referensi yang dimaksud dalam makalah ini adalah nilai konduktivitas termal suatu produk yang dipublikasikan, baik di penerbitan ilmiah maupun dokumen lainnya yang dapat dijadikan acuan. Hal ini ditempuh karena tidak ada produk standar yang dapat dijadikan sebagai acuan “nilai referensi yang benar”.

Tabel 3 Konduktivitas Termal Hasil Pengukuran

| | Konduktivitas Termal (W/m.K) | |
|-------------------|------------------------------|--|
| | Hasil Pengukuran | Referensi |
| Papan fiber semen | 0,211 | 0,18 ¹⁾ 0,21 ²⁾ |
| Papan gypsum | 0,131 | 0,166 ± 0,0106 ³⁾ |
| Bata merah | 0,407 | 0,150 - 0,380 ⁴⁾ |
| Bata ringan | 0,172 | 0,132 ⁵⁾ 0,11 - 0,21 ⁶⁾ 0,16 ⁷⁾ |

Keterangan:

- 1) Dokumen spesifikasi produk Somex Group.
- 2) Diolah dari data spesifikasi Gyproc® Fibre Cement Board, www.gyproc.in
- 3) Metode uji ASTM C177. Nilai untuk density rata-rata 763 kg/m³, diolah dari Dokumen No. GA-235-10. *Gypsum Board Typical Mechanical And Physical Properties*. Gypsum Association, MD-USA. 2010.
- 4) Halauddin (2006) [10]
- 5) Ungkoon (2010). Nilai untuk density 577 kg/m³ [11]
- 6) Narayanan (2000). Nilai untuk density 600 kg/m³ - 700 kg/m³ [12]
- 7) Website resmi Hebel Indonesia, www.hebel.co.id/spesifikasi/blok/blok-hebel/

Alternatif Metode Perhitungan

Nilai konduktivitas termal hasil pengukuran di kotak pengukuran yang ditampilkan pada Tabel 3 adalah berdasarkan hasil perhitungan resistansi termal sesuai prosedur ASTM C1155 yang memenuhi persyaratan nilai CR dan koefisien variansi yang ditentukan. Data-data yang diperoleh dari pengukuran di kotak pengukuran menggunakan sistem instrumen TRSYS01 tetap menunjukkan kualitas yang baik meskipun dievaluasi dengan cara perhitungan secara statistik. Data dikumpulkan dengan dua set sensor. Satu set terdiri dari satu buah sensor *heat flux* dan sepasang *thermocouple*. Data direkam tiap interval

sepuluh menit. Hasil evaluasi diperlihatkan pada Tabel 4. Nilai R untuk masing-masing set sensor ditunjukkan oleh R_1 dan R_2 yang dinyatakan dengan tingkat kepercayaan 95%. R_{12} adalah nilai resistansi termal apabila data dari sensor ke-1 dan sensor ke-2 digabungkan. R_m adalah nilai rata-rata resistansi termal dari beberapa kelompok sensor yang diperoleh sesuai prosedur ASTM C1155. Nilai R_{12} menunjukkan nilai yang hampir sama dengan R_m . Dengan demikian, kumpulan data hasil pengukuran di kotak pengukuran dapat diperlakukan sebagaimana data pengukuran lainnya untuk memperoleh nilai resistansi termal selain dengan metode perhitungan ASTM C1155.

Tabel 4 Hasil Evaluasi Data Pengukuran

| Bahan | Durasi Pengukuran (Menit) | Jumlah Data Per Set Sensor | Resistansi Termal (m ² .K/W) | | | |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|---|---------------|---------------|---------------|
| | | | R _m | R1 | R2 | R12 |
| Fiber semen 6 mm | 300 | 31 | 0,029 | 0,033 ± 0,002 | 0,027 ± 0,001 | 0,030 ± 0,001 |
| Gypsum tipe standar 9 mm | 1260 | 127 | 0,068 | 0,063 ± 0,006 | 0,082 ± 0,016 | 0,072 ± 0,009 |
| Bata merah 100 mm | 1440 | 145 | 0,246 | 0,247 ± 0,004 | 0,248 ± 0,003 | 0,247 ± 0,002 |
| Bata ringan 100 mm | 1440 | 145 | 0,583 | 0,607 ± 0,025 | 0,541 ± 0,023 | 0,574 ± 0,017 |

Estimasi nilai resistansi termal yang lebih baik diperoleh apabila dilakukan seleksi data. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada permulaan pengujian, ketika perbedaan temperatur antara dua sisi permukaan masih rendah, nilai perkiraan resistansi termal akan tampak tidak logis. Estimasi nilai resistansi termal R_e dihitung sebagai dT/Q , dengan Q adalah laju aliran kalor dan dT adalah beda temperatur. Maka, ketika beda temperatur mendekati nol, akan diperoleh nilai R_e yang sangat rendah, atau dengan kata lain dinding bersifat sangat konduktif. Hal ini terjadi pada periode awal pengukuran. Maka, apabila data yang digunakan adalah data dengan dT yang cukup tinggi, akan diperoleh kumpulan data yang menghasilkan estimasi nilai R_e dengan tingkat presisi yang baik (lihat Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5).

KESIMPULAN

Sistem instrumentasi untuk pengukuran resistansi termal bahan bangunan telah dibuat dan diuji coba. Sistem yang dikembangkan menggunakan prinsip pengukuran aliran kalor (*heat flux*) dengan metode pengambilan data insitu yang mengadopsi ASTM C1155. Lingkungan kotak pengukuran yang terdiri dari kotak panas dan kotak dingin memberikan beda temperatur yang cukup besar dan stabil selama pengukuran. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode pengukuran memberikan hasil yang baik dengan waktu pengukuran yang jauh lebih cepat dibandingkan pengukuran secara insitu.

Evaluasi diperlukan untuk membangun sistem kalibrasi yang diperlukan dalam rangka menjamin hasil pengukuran. Hasil pengukuran resistansi termal dalam lingkungan yang terkondisi ini perlu dibandingkan dengan pengukuran insitu dengan metode yang sama, yaitu metode aliran kalor atau dengan metode pengukuran laboratorium lain yang relevan misalnya metode *hotbox*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan kegiatan. Kegiatan ini dibiaya oleh APBN tahun

anggaran 2013 melalui Satuan Kerja Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum.

REFERENSI

- Halaudidin. 2006. "Pengukuran Konduktivitas Termal Bata Merah Pejal". *Jurnal Gradien* Vol. 2 No. 2 Juli 2006 : 152-155. ISSN 0216-2393. Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Ian Cox-Smith. 2008. "In-situ measurement of thermal resistance for suspended timber floor". BRANZ Study Report SR 202 (2008). Building Research Levy. ISSN: 1178-4938
- J.B. Fang, R.A. Grot, dan H.S. Park. 1985. "The Assessment of Accuracy of the In-situ Methods for measuring building envelope thermal resistance".
- K.M. Fowler, E.M. Rauch. 2006. "Sustainable Building Rating Systems Summary". Pacific Northwest National Laboratory.
- Narayanan, N. dan K. Ramamurthy. 2000. "Structure And Properties Of Aerated Concrete: A Review". *Cement & Concrete Composite* 22. halaman 321-329. Elsevier.
- P. Baker. 2011. "U-values and traditional buildings: In situ measurements and their comparisons to calculated values". *Historic Scotland Technical Paper 10*. Diunduh dari: www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers. [22 April 2014]
- Rajendra S. Adhikari, Elena Lucchi, dan Valeria Pracchi. 2012. "Experimental Measurements on Thermal Transmittance of the Opaque Vertical Walls in the Historical Buildings". Dibawakan pada PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an Environmentally Responsible Architecture Lima, Perú 7-9 November 2012.
- Richard Reed, Anita Bilos, Sara Wilkinson, dan Karl-Werner Schulte. 2009. "International Comparison of Sustainable Rating Tools". *The Journal of Sustainable Real Estate*, Vol. 1 No. 1.
- Sean Doran. 2001. "Field investigations of the thermal performance of construction elements as built". BRE Client Report No.

78132. Building Research Establishment Ltd. Glasgow.
- SNI 6389:2011. Konservasi selubung bangunan pada bangunan gedung. Badan Standardisasi Nasional.
- Soki Rhee-Duverne dan Paul Baker. 2013. "Research Into The Thermal Performance Of Traditional Brick Walls". Research Report. English Heritage.
- Ungkoon, Y. 2010. "Study of Thermal Properties of Aerated Concrete Walls". *The Journal of Applied Science*. Vol. 9 No. 1. ISSN 1513-7805. Thailand.