

# OMakara

SERI TEKNOLOGI

## **Pendekatan Analitis dan Simulasi Komputer Desain Blok Kaca Rendah Energi**

Floriberta Binarti<sup>1</sup>, Agustinus Djoko Istiadji<sup>1</sup> & Prasasto Satwiko

Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,  
Yogyakarta 55281, Indonesia

Priyo Tri Iswanto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,  
Yogyakarta 55281, Indonesia

Halaman 115-122

**DEWAN REDAKSI**  
**Jurnal Makara Seri Teknologi**  
SK Dirjen Dikti Akreditasi Jurnal No. 110/DIKTI/Kep/2009

**Pengarah:**  
Bachtiar Alam  
Budiarso

**Pemimpin Umum:**  
Agustino Zulys

**Ketua Editor:**  
Misri Gozan (Universitas Indonesia)

**Dewan Editor:**

Axel Hunger (Computer Science and Communications Engineering, Universitat Duisburg Essen, Germany)	Nurul Taufiqu Rochman (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia)
Haryodwito Armono (Institut Teknologi Sepuluh Nopember)	Purnomo Sidi Priambodo (Universitas Indonesia)
Iis Sopyan (Internasional Islamic Universitas Malaysia)	Rahyani Ermawati (Kementerian Perindustrian RI)
Isti Surjandari Prajitno (Universitas Indonesia)	Roy Woodhead (HP Enterprise Services, United Kingdom)
Kemas Ridwan Kurniawan (Universitas Indonesia)	Siswa Setyahadi (Badan Pengkajian Penerapan Teknologi)
Mohamed Ali Berawi (Universitas Indonesia)	Slamet (Universitas Indonesia)
Nandy Setiadi Djaja Putra (Universitas Indonesia)	Sri Harjanto (Universitas Indonesia)

**Editor Pelaksana:**  
Citra Wardhani (Universitas Indonesia)  
Mukhlis Sutami (Universitas Indonesia)

**Administrasi:**  
Lilies Hasanah, Puji Astuti, Cucu Sukaesih

**Disain Grafis:**  
Ahmad Nizhami

**Penerbit:**  
Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat  
Universitas Indonesia  
Kampus Universitas Indonesia  
Depok 16424  
Indonesia

**Kantor:**  
Gedung DRPM-UI, Kampus Universitas Indonesia,  
Depok 16424, Indonesia  
Telp.+62 21 7270152; 78849118 Fax.+62 21 78849119  
Homepage: <http://journal.ui.ac.id>  
E-mail: editor\_mst@ui.ac.id

MAKARA Seri TEKNOLOGI merupakan jurnal ilmiah yang menyajikan artikel orisinal tentang pengetahuan dan informasi riset atau aplikasi riset dan pengembangan terkini dalam bidang teknologi. Jurnal ini merupakan sarana publikasi dan ajang berbagi karya riset dan pengembangannya di bidang teknologi. Pemuatan artikel di jurnal ini dialamatkan ke kantor editor, dapat melalui e-mail/journal online/Web. Informasi lengkap untuk pemuatan artikel dan petunjuk penulisan artikel tersedia di dalam setiap terbitan. Artikel yang masuk akan diperiksa oleh mitra bestari dan para editor. Jurnal ini terbit secara berkala sebanyak dua kali dalam setahun (April dan November). Pemuatan naskah tidak dipungut biaya. MAKARA Seri TEKNOLOGI adalah peningkatan dari MAKARA Seri B: Bidang Sains dan Teknologi sebagai penyempurnaan dari Jurnal Penelitian Universitas Indonesia MAKARA yang terbit sejak Januari 1997. Jurnal MAKARA Seri TEKNOLOGI terakreditasi B menurut Keputusan Direktur Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional Nomor: 110/DIKTI/Kep/2009 (masa berlaku Oktober 2009 s.d. Oktober 2012).

MAKARA Seri TEKNOLOGI (MAKARA of Technology Series) is a scientific journal publishing original articles on new knowledge and research or research application with current issues in technology. The journal is published by the Directorate of Research and Community Services, Universitas Indonesia and provides a broad-based forum for the publication and sharing of ongoing research and development in technology. The paper to be presented in this journal is addressed to the editorial office or e-mail. The complete information regarding the procedures to send an article is available in each volume and on its website. All articles will be subjected to double-blind peer review process following a review by the editors. MAKARA Seri Teknologi is an elaboration of MAKARA Seri B: Sains dan Teknologi that was the improvement of Jurnal Penelitian Universitas Indonesia MAKARA, which has been published since Januari 1997. Starting from 2008, the journal has been periodically published twice a year (April and November). Full text articles are available from Volume 6 No. 1 April 2002 free of charge.

Mengutip ringkasan dan pernyataan atau mencetak ulang gambar atau tabel dari jurnal ini harus mendapat izin langsung dari penerbit. Produksi ulang dalam bentuk kumpulan cetakan ulang atau untuk kepentingan periklanan atau promosi atau publikasi ulang dalam bentuk apapun harus seizin salah satu penulis dan mendapat lisensi dari penerbit. Jurnal ini diedarkan sebagai tukaran untuk perguruan tinggi, lembaga penelitian dan perpustakaan di dalam dan luar negeri. Hanya iklan menyangkut teknologi dan produk yang berhubungan dengannya yang dapat dimuat pada jurnal ini.

Permission to quote excerpts and statements or reprint any figures or tables in this journal should be obtained directly from the publisher. Reproduction in a reprint collection or for advertising or promotional purposes or republication in any form requires permission of one of the authors and a licence from the publisher. This journal is distributed for national and regional higher institution, institutional research and libraries. Only advertisements of technology or related products will be allowed space in this journal.

- Penambahan Tembaga pada Komposit PP/C dan Pengaruhnya pada Sifat Mekanik dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu** 101  
*Anne Zulfia, Taufik Abimanyu, dan Verina Warga Dalam*
- Analisis Flutter Sirip Roket Balistik RX-420 dengan Melibatkan Modus Gerak Kaku Struktur Roket** 107  
*Novi Andria*
- Pendekatan Analitis dan Simulasi Komputer Desain Blok Kaca Rendah Energi** 115  
*Floriberta Binarti, Agustinus Djoko Istiadji, Prasasto Satwiko, dan Priyo Tri Iswanto*
- Papan Serat Berkerapatan Sedang Berbahan Baku Sludge Terasetilasi dari Industri Kertas** 123  
*Luthfi Hakim, Evalina Herawati, dan I Nyoman Jaya Wistara*
- Sambungan Lentur sebagai Penahan Benturan Dua Gedung Tinggi yang Dibangun Berdampingan** 131  
*Yuskar Lase dan James Jatmiko Oetomo*
- Improvement of High Temperature Oxidation of Low Carbon Steel Exposed to Ethanol Combustion Product at 700 °C by Hot-Dip Aluminizing Coating** 137  
*Mohammad Badaruddin*
- Optimization of Nitrogen and Phosphorus in Azolla Growth as Biofertilizer** 142  
*Hany Handajani*
- Penerapan Metode *Principal Component Proximity Transform* dan Geostatistik untuk Pemodelan Penyebaran *Volume Shale* sebagai Pencitraan Karakteristik Reservoir pada *Seismic 3D*** 147  
*Nur Islami*

## PENDEKATAN ANALITIS DAN SIMULASI KOMPUTER DESAIN BLOK KACA RENDAH ENERGI

Floriberta Binarti<sup>1\*)</sup>, Agustinus Djoko Istiadji<sup>1</sup>, Prasasto Satwiko<sup>1</sup>, dan Priyo Tri Iswanto<sup>2</sup>

1. Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia
2. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia

*\*)E-mail: flo.binarti@gmail.com*

---

### Abstrak

Proses produksi yang ramah lingkungan dikembangkan untuk mengolah limbah kaca menjadi blok kaca dengan kandungan energi yang rendah. Tingkat efisiensi energi blok kaca tersebut dicapai dengan tingkat transmisi panas secara konduksi (U) sebesar  $\leq 3,177 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  maupun radiasi (SHGC)  $\leq 0,25$  serta tingkat transmisi cahaya tampak (VT)  $\geq 0,27$ . Rongga diaplikasikan untuk menurunkan U dengan penurunan VT secara tidak signifikan. Metode analitis dipilih untuk menghitung U model blok kaca tanpa mempertimbangkan pengaruh konveksi. Untuk menganalisis VT dan SHGC setiap model dilakukan simulasi tingkat terang dan beban kalor di dalam bangunan dengan program Ecotect. Pengaruh konveksi diamati dari hasil simulasi CFD yang menggambarkan kecepatan aliran udara di dalam rongga dan gradien suhu pada blok kaca. Efisiensi yang dicapai oleh aplikasi model blok kaca ini mencapai 96% lebih rendah dibandingkan dengan pemakaian energi pada aplikasi dengan kaca 3 mm. Studi simulasi ini masih mengabaikan keberadaan perekat antar lapisan kaca yang berpotensi menurunkan VT dan SHGC blok kaca.

### Abstract

**Analytical and Computational Simulation Approaches to Design Low Energy Glass Block.** An environmentally friendly process was developed to produce a low embodied energy glass block from waste glasses. The energy efficiency of the glass block is represented by its thermal conductance (U)  $< 3.177 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and solar transmittance (SHGC)  $\leq 0.25$  as well as visible light transmission (VT)  $\geq 0.27$ . A cavity was applied to reduce U value while insignificantly reducing VT. Analytical method was used to calculate the U value of glass blocks, ignoring the effect of convection. Ecotect program was used to analyze light level (VT) and heat load (SHGC) of each model. Effect of convection was simulated using a CFD program, which showed air velocity inside the cavity and temperature gradient in glass blocks. Comparing to an application with 3 mm float glass, energy efficiency obtained through applying the glass blocks could reach 96%. This simulation study ignored the presence of adhesive among glass layers that potentially reduces the VT and the SHGC of the glass blocks.

*Keywords: analytical approach, cavity, computational simulation, glass block, low energy*

---

### 1. Pendahuluan

Bidang kaca pada bangunan tidak saja menyalurkan cahaya alami, tetapi juga radiasi panas yang berdampak pada kenyamanan termal. Hampir semua kaca merupakan perangkap radiasi panas matahari. Proses produksi kaca menghasilkan CO<sub>2</sub> sebesar 500 kg hingga 900 kg untuk setiap satu ton produksi kaca [1]. Proses produksi yang membutuhkan pemanasan pada suhu sangat tinggi dan dampak aplikasinya pada konsumsi energi bangunan menjadikan kaca sebagai material dengan kandungan energi tinggi.

Daur ulang kaca akan mengurangi beban lingkungan akibat CO<sub>2</sub> yang dihasilkan pada proses produksi, maupun volume limbah yang harus ditanam di dalam tanah. Sejauh ini, pemrosesan kembali kaca hanya mampu menghemat kandungan energi hingga sekitar 20% sementara pemanfaatan kembali kaca dapat menghemat kandungan energi hingga hampir 100% [2].

Pemanfaatan limbah kaca dalam bentuk blok kaca melalui proses laminasi merupakan solusi yang ditawarkan untuk mengurangi beban lingkungan sekaligus untuk menghemat konsumsi energi bangunan.

Pemanfaatan limbah dan proses produksi yang ramah lingkungan menjadi penekanan utama upaya menciptakan material dengan kandungan energi yang rendah. Tingkat efisiensi energi dari aplikasi material baru pada bangunan merupakan kriteria sekunder. Untuk memperoleh desain blok kaca dengan kandungan energi serendah mungkin dipilih metode yang efisien di dalam proses perancangan blok kaca, yakni dengan pendekatan analitis dan simulasi.

Blok kaca dapat disebut efisien energi jika mampu meneruskan cahaya tampak semaksimal mungkin dengan transmisi panas yang minimal. Kemampuan meneruskan cahaya tampak diukur dari nilai *visible light transmittance* (VT), *solar heat gain coefficient* (SHGC) dan *thermal transmittance* (U) merupakan tolok ukur besarnya transmisi panas secara radiasi dan secara konduksi sebuah bahan. Nilai optimal kinerja energi bahan transparan dinyatakan sebagai rasio antara VT dan SHGC bahan transparan tersebut yang disebut sebagai *light to solar gain* (LSG). Bahan transparan dengan LSG  $\geq 1,4$  sangat direkomendasikan untuk daerah tropis lembab [3].

Produk nasional blok kaca dengan tebal sekitar 10 cm saat ini rata-rata memiliki SHGC sebesar 0,57 dan VT sebesar 0,67 [4]. Corning menghasilkan blok kaca efisien energi yang mampu mencapai nilai 0,35 untuk SHGC, dengan VT sebesar 0,71 dan 2,27 W/m<sup>2</sup>.K untuk U. Tingkat LSG yang tinggi dicapai dari aplikasi lapisan dengan emisivitas rendah di dalam panel kaca *sandwich* [5]. Teknologi lain yang diterapkan oleh Atherton berupa lapisan perekat dingin yang diklaim mampu menciptakan blok kaca yang efisien energi [6]. Tidak dijelaskan berapa VT, U dan SHGC blok kaca yang diciptakan. Hingga kini belum ada studi tentang pemanfaatan limbah kaca sebagai blok kaca maupun tingkat efisiensi energinya.

Studi ini mencoba untuk menjawab tantangan pemanfaatan kembali kaca sebagai bahan baru dengan kandungan energi yang rendah. Kriteria kandungan energi yang rendah dapat dicapai mulai dari aspek pemilihan bahan baku, proses produksi, transportasi hingga dampak aplikasi pada konsumsi energi bangunan.

## 2. Metode Penelitian

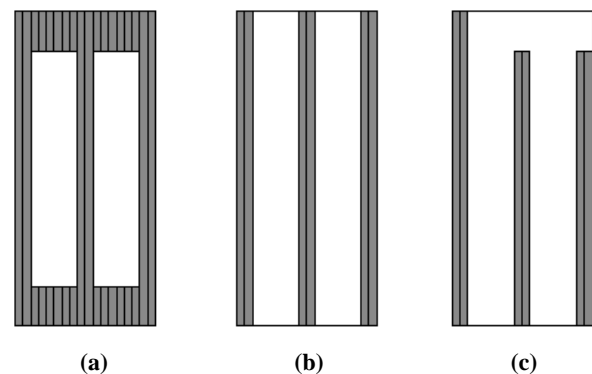
Berdasarkan Energy Conservation Code 2006, baku bangunan yang efisien energi untuk daerah tropis lembab salah satunya diukur dari fenestrasi vertikalnya yang memiliki U maksimal sebesar 3,177 W/m<sup>2</sup>.K dan SHGC maksimal sebesar 0,25. VT minimum bergantung pada besarnya rasio luas jendela terhadap luas dinding eksterior (*window to wall ratio*; WWR). Jendela yang kecil disyaratkan memiliki VT minimum sebesar 0,27 dan yang berukuran besar harus memiliki

VT tidak kurang dari 0,11 [7]. Berdasarkan baku tersebut ditetapkan acuan model blok kaca yang efisien energy, yaitu yang memiliki LSG maksimum dengan mengupayakan nilai SHGC mendekati 0,25 dan U  $\leq 3,177$  W/m<sup>2</sup>.K.

Pada tahap pertama dilakukan pengembangan variasi model blok kaca. Proses laminasi potongan limbah kaca tanpa pemanasan dengan perekat transparan dipilih untuk menciptakan blok kaca dengan kandungan energi yang rendah. Laminasi potongan limbah kaca yang menghasilkan susunan lapisan kaca tidak saja akan menurunkan U dan SHGC kaca, tetapi juga menurunkan VT kaca. Penerapan rongga udara dipilih sebagai cara optimal untuk menurunkan U dan SHGC kaca dengan penurunan VT seminimal mungkin [8]. Menentukan tebal blok kaca berikut tebal dan lebar rongga menjadi kunci untuk menciptakan blok dinding kaca dengan kombinasi U dan SHGC yang rendah tetapi memiliki VT tinggi. Pendekatan analitis dan simulasi digunakan untuk menganalisis model blok kaca dengan kombinasi U, SHGC, dan VT yang optimal.

Setiap model dibuat dengan dua variasi rongga, yaitu rongga buntu dan rongga menerus yang berpasangan dengan rongga ujung, dengan pertimbangan model ini yang tepat diaplikasikan sebagai upaya penyejukan pasif blok kaca pada ruangan dengan sistem ventilasi mekanis (Gambar 1). Rongga ujung dipasang pada ujung atas dan bawah dari kolom blok dinding kaca yang berongga menerus sebagai *inlet* dan *outlet* aliran udara yang melewati rongga.

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk memperkirakan nilai VT dari setiap model blok kaca dengan program Ecotect-Radiance yang divalidasi oleh hasil pengukuran VT dari beberapa variasi lapisan kaca bening di lapangan. Radiance (*plug-in* Ecotect) menggunakan metode *ray tracing* sebagai algoritmanya. Beberapa studi telah membuktikan akurasi metode ini [9-10].



Gambar 1. Potongan Vertikal Secara Melintang dari Salah Satu Model Blok Kaca dengan (a) Rongga Buntu, (b) Rongga Menerus dan (c) Rongga Ujung

Untuk menganalisis VT, dilakukan simulasi pada dua kotak dengan permukaan hitam doff (daya pantul ≈ 0) pada kondisi langit yang sama (Gambar 2). Satu kotak digunakan sebagai kondisi batas (*boundary conditions*) bagi tingkat terang yang jatuh di tengah-tengah kotak tanpa kaca ( $E_0$ ) dan kotak lainnya digunakan sebagai kondisi batas bagi tingkat terang yang menembus blok kaca yang diukur ( $E_i$ ). Nilai VT blok kaca yang diukur diperoleh dengan membagi  $E_i$  dengan  $E_0$ . Semua model blok kaca disimulasikan pada kondisi langit dengan tingkat terang sebesar 9897 lux, yaitu pada 2 Maret pukul 12:00. Pada waktu ini, matahari berada di zenith sehingga VT blok kaca merupakan VT maksimum. Pengukuran VT kaca 3 mm, 5 mm dan susunan beberapa lapis kaca dengan atau tanpa rongga dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi dengan faktor koreksi hasil simulasi sebesar 12% lebih tinggi.

Tahap ketiga dilakukan untuk memperkirakan nilai SHGC melalui pendekatan simulasi beban panas radiasi matahari ( $Q_g$ ) dengan fasilitas *Losses and Gains* pada program Ecotect. Fasilitas *Losses and Gains* digunakan untuk menganalisis aliran panas dengan *Admittance method*. Metode ini bekerja berdasarkan konsep variasi siklus. Meskipun tidak seakurat *response factor method* atau *finite difference*, fasilitas ini sangat membantu dalam menganalisis termal bangunan dengan perbedaan suhu dan aliran energi dengan kondisi “*steady state*”, seperti ruangan yang dikondisikan secara mekanis [11].

Nilai SHGC dihitung dengan membandingkan besarnya panas yang ditransmisikan oleh bahan yang diuji terhadap panas yang ditransmisikan oleh lembaran kaca 3 mm pada kondisi batas yang sama. Bahan uji maupun kaca 3 mm ditempatkan pada kotak dengan ukuran dan sifat-sifat termal sama yang bersifat *adiabatic*. Karena kondisi yang dipilih pada hari terpanas dan pada posisi horisontal, maka SHGC hasil simulasi merupakan nilai

maksimum. Dengan menggunakan nilai SHGC kaca bening 3 mm, maka nilai SHGC blok kaca yang diukur dapat ditentukan dengan persamaan (1).

$$SHGC_{\text{blok kaca}} = \frac{Q_{g \text{ blok kaca}}}{Q_{g \text{ 3mm}}} \cdot SHGC_{3mm} \quad (1)$$

Untuk meringankan kerja komputer, model untuk simulasi VT dan SHGC masih mengabaikan keberadaan perekat antar lapisan kaca.

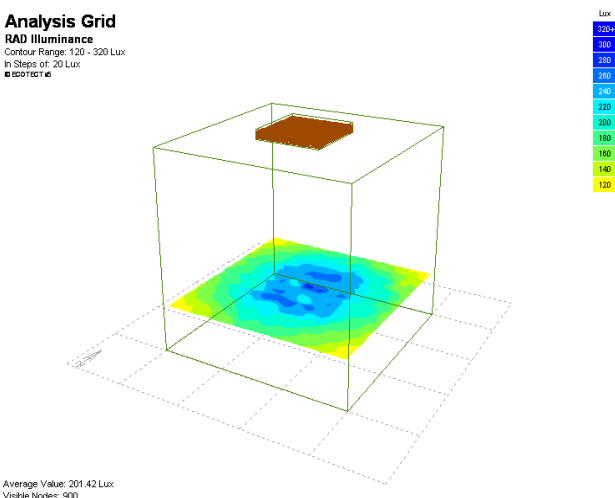
Pendekatan secara analitis digunakan untuk menentukan nilai U. Nilai U untuk bahan yang terdiri atas beberapa lapisan dan rongga dihitung dengan persamaan (2).

$$U = \frac{1}{1/f_0 + b_1/k_1 + R + b_2/k_2 + 1/f_1} \quad (2)$$

Nilai konduktansi permukaan luar ( $f_0$ ) untuk daerah tropis lembab dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 3 m/det adalah sekitar 15 W/m<sup>2</sup>.K. Nilai konduktansi permukaan dalam ( $f_1$ ) menggunakan konduktansi permukaan dinding interior yang besarnya 8,12 W/m<sup>2</sup>.K. Rumus ini merupakan metode sederhana untuk menentukan nilai U pada bahan tanpa proses konveksi di dalam rongga.

Untuk mengetahui pengaruh proses konveksi pada bahan dengan rongga terbuka digunakan Program Computational Fluid Dynamic (CFD) ACE v. 2004 untuk simulasi suhu di dalam blok kaca. Keandalan program ini ditunjukkan oleh hasil validasi yang dilakukan Satwiko, *at al.* [12] yang menggambarkan analisis aliran udara yang hampir mendekati data lapangan dengan deviasi sebesar 0,003 hingga 0,027 untuk simulasi 3 dimensi dengan model turbulen standard k-ε. Hasil simulasi CFD ACE yang mendekati hasil eksperimen juga ditunjukkan oleh beberapa validasi yang pernah dilakukan sebelumnya [13-14].

Simulasi CFD dilakukan dengan kondisi batas yang sesuai dengan kondisi termal kota Yogyakarta. Panas radiasi matahari yang jatuh pada permukaan kaca ditentukan berdasar hasil simulasi Ecotect pada saat kondisi terpanas, yakni sebesar 540 W/m<sup>2</sup>. Kecepatan angin diasumsikan sangat rendah, yaitu sebesar 0,1 m/s dengan suhu rata-rata terendah di Yogyakarta sebesar 26,83 °C. Untuk menetapkan model yang terbaik, digunakan suhu yang rendah agar perbedaan efek konveksi antar model dapat terlihat lebih jelas. Pengaruh konveksi pada aplikasi 3 jenis blok kaca, yaitu tanpa rongga, dengan rongga terbuka dan dengan rongga tertutup juga disimulasikan dengan CFD ACE. Simulasi dilakukan pada model bangunan dengan susunan blok kaca seluas 1 m<sup>2</sup> pada satu sisi dindingnya.



**Gambar 2. Model Blok Kaca di Dalam Kotak Hitam Doff dengan Hasil Simulasi Tingkat Terang**

Analisis keseimbangan energi dilakukan pada tahap terakhir dari proses perancangan blok kaca rendah energi. Pada tahap ini model blok kaca dengan kombinasi nilai VT, U, dan SHGC yang memenuhi kriteria akan diuji dengan simulasi untuk mengetahui efisiensi beban kalor yang dihasilkan. Fasilitas *Losses and Gains* pada Ecotect digunakan untuk menganalisis besarnya beban kalor yang mengalir secara konduksi dan radiasi dari sebuah model bangunan *adiabatic* berukuran 3 m x 3 m x 3 m.

Pengaruh VT blok kaca dihitung dari besarnya kalor yang ditransmisikan oleh blok kaca ke dalam model bangunan dan yang dihasilkan oleh lampu sebagai suplemen untuk mencapai tingkat terang ruang yang sama dengan tingkat terang yang dihasilkan oleh kaca 3 mm. Diasumsikan setiap 1 W pemakaian lampu hemat energi pada ruang setinggi 3 m akan menghasilkan tingkat terang sebesar 11 lux dengan kalor sebesar 20% dari daya yang dibutuhkan oleh lampu tersebut. Tingkat efisiensi energi blok kaca akan dihitung dari jumlah selisih antara besarnya kalor yang mengalir secara konduksi dan radiasi pada ruangan dengan kaca 3 mm dan besarnya kalor yang mengalir melalui setiap blok kaca ditambah dengan besarnya kalor yang dihasilkan oleh pemakaian lampu untuk menutupi perbedaan tingkat terang interior.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Model blok kaca tersusun dari potongan limbah kaca bening tebal 3 mm dan 5 mm yang banyak ditemukan dalam bentuk limbah konstruksi. Potongan kaca dibuat dengan ukuran rata-rata 5 cm x 5 cm untuk memperoleh

jumlah kepingan maksimal dari limbah kaca dengan biaya tenaga pemotongan yang seminimal mungkin. Mozaik kaca dalam bentuk lembaran selanjutnya dilaminasi dalam bentuk blok kaca dengan tebal <12 cm. Pada penelitian ini ditetapkan hanya ukuran 20 cm x 20 cm yang akan diteliti dengan pertimbangan konstruksi, kemudahan dalam perekatan serta ukuran blok kaca yang umum digunakan. Tahap pengembangan menghasilkan 24 model blok kaca yang masing-masing memiliki tiga variasi rongga.

Hasil kalkulasi U dan simulasi VT pada 24 model blok kaca dengan variasi jumlah lapisan, tebal blok kaca maupun rongga menunjukkan beberapa indikasi. Blok kaca dengan tebal keseluruhan yang sama tetapi dengan tebal rongga berbeda akan menciptakan perbedaan nilai U yang signifikan dengan perbedaan VT yang tidak signifikan. Jumlah lapisan memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap penurunan VT dibandingkan dengan ketebalan setiap lapisannya. Blok kaca dengan jumlah lapisan yang sama dengan tebal lapisan berbeda (kaca 5 mm dan kaca 3 mm) akan memiliki nilai VT yang hampir sama.

Dapat disimpulkan bahwa kaca 5 mm lebih efektif di dalam menghasilkan blok kaca dengan kinerja energi tinggi. Model blok dengan kaca 3 mm tidak dikembangkan lebih lanjut karena pertimbangan nilai ekomis pemotongan. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk menganalisis perbedaan suhu (*temperature gradient*) dan SHGC model blok kaca berbahan baku kaca 5 mm dengan hasil sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 1.

**Tabel 1. Properti Energi Model Blok Kaca**

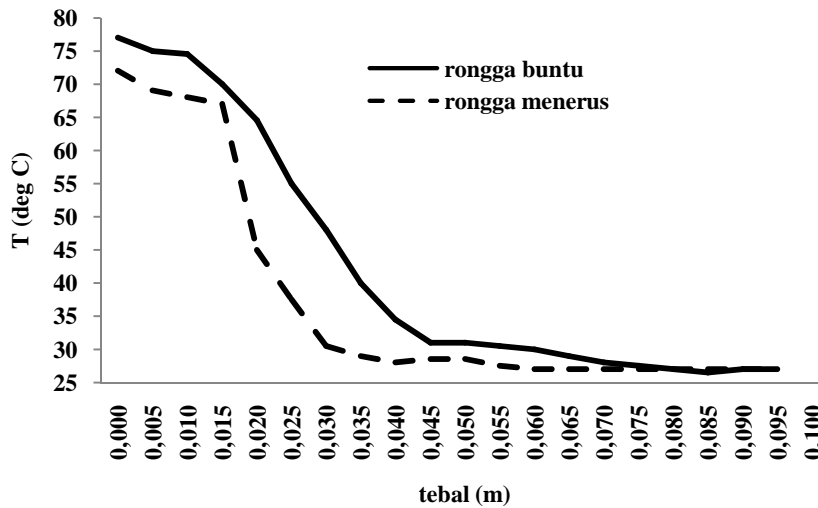
Kode model	Rongga buntu							Rongga menerus						
	U	T <sub>s</sub>	T <sub>i</sub>	ΔT	VT	SHGC	LSG	U	T <sub>s</sub>	T <sub>i</sub>	ΔT	VT	SHGC	LSG
110_12x2_r1_30	2,60	77,5	31,5	46	0,52	0,65	0,80	2,29	74	29,5	44,5	0,52	0,64	0,81
111_12x3_r1_25	2,54	65,5	30	35,5	0,41	0,65	0,63	2,24	64,5	28	36,5	0,41	0,64	0,64
112_12x2_r1_40	3,24	78	30	48	0,52	0,74	0,70	3,01	72,5	28	44,5	0,52	0,73	0,71
113_12x3_r1_35	3,17	67	29	38	0,40	0,73	0,55	2,95	64	28	36	0,40	0,71	0,56
114_14x2_r3_10	2,55	75	28	47	0,40	0,71	0,56	2,14	70	28	42	0,40	0,69	0,58
114_13x2_r2_20	2,56	77,5	28	49,5	0,40	0,72	0,56	2,28	72	28	44	0,40	0,70	0,57
115_13x3_r2_15	2,50	67	28	39	0,28	0,70	0,40	2,85	62	27,5	34,5	0,28	0,68	0,41
115_12x3_r1_45	3,06	67	28	39	0,40	0,71	0,56	2,22	63,5	27,5	36	0,40	0,69	0,58
118_13x2_r2_30	2,60	77	27	50	0,31	0,57	0,54	2,29	72	27	45	0,31	0,56	0,55
119_13x3_r2_25	2,54	67	27	40	0,27	0,59	0,54	2,24	64	27	37	0,27	0,56	0,48
120_14x2_r3_20	2,30	78	27	51	0,31	0,67	0,46	1,94	73	27	46	0,31	0,65	0,48
121_14x3_r3_15	2,28	65	27	38	0,19	0,66	0,29	1,93	62,5	27	35,5	0,19	0,64	0,30
Minimum	2,28	65	27	35,5	0,19	0,57	0,29	1,93	62	27	34,5	0,19	0,56	0,30
Maksimum	3,24	78	31,5	51,0	0,52	0,74	0,80	3,01	74	29,5	46	0,52	0,73	0,81

Karena nilai U pada blok kaca dengan rongga menerus dihitung secara matematis saja, maka besarnya U belum menggambarkan efek konveksi yang terjadi di dalam rongga. Perbedaan antara nilai U pada blok kaca dengan rongga buntu dan pada blok kaca dengan rongga menerus hanya disebabkan oleh pengurangan sebagian lapisan kaca pada setiap rongga menerus.

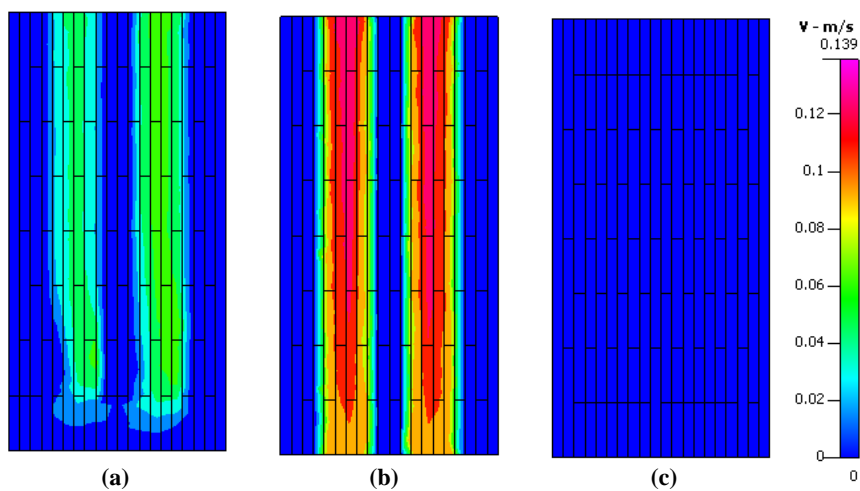
Secara umum efek konveksi akan menurunkan perbedaan suhu antara indoor dan outdoor ( $\Delta T$ ) (Gambar 3). Hanya model I11\_I2 x 3\_r1\_25 yang mengalami peningkatan  $\Delta T$ . Perbandingan penurunan U dan penurunan  $\Delta T$  oleh adanya efek konveksi (rongga menerus) hampir sama. Masing-masing memiliki rerata sebesar 1,13 (untuk U) dan 1,08 (untuk  $\Delta T$ ). Efek konveksi pada rongga menerus dan rongga ujung

ditunjukkan oleh aliran udara dengan kecepatan hingga 0,12 m/s (Gambar 4). Peningkatan kecepatan angin hingga 3 m/s kemungkinan besar akan meningkatkan aliran udara di dalam blok kaca.

Penurunan kecepatan aliran udara terjadi pada rongga ujung dengan lebih dari satu rongga. Rongga yang terlalu lebar ( $>25$  mm) juga menurunkan aliran udara. Aliran udara ini memengaruhi gradien suhu pada blok kaca. Keberadaan rongga akan mempercepat penurunan suhu di dalam blok kaca sehingga suhu permukaan luar blok kaca mengalami penurunan. Penambahan rongga hanya sedikit menurunkan perbedaan suhu antara permukaan dalam dan permukaan luar, tetapi mampu mempercepat proses penurunan suhu di dalam blok kaca.



Gambar 3. Gradien Suhu (Fungsi T dalam °C terhadap Tebal Blok Kaca dalam m) Model I18\_I3x2\_r2\_30 dengan Rongga Buntu (—) dan Rongga Menerus (---)



Gambar 4. Kecepatan Aliran Udara (m/s) Model I18\_I3x2\_r2\_30 (dari Kiri ke Kanan) dengan Rongga Ujung (a), Rongga Menerus (b), dan Rongga Buntu (c)



Model dengan ketebalan paling kecil (110\_12 x 2\_r1\_30) memiliki VT dan LSG paling besar. Dengan nilai U sebesar  $2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  konduksi panas yang melalui blok kaca relatif kecil. Model ini memiliki gradien suhu yang relatif tinggi, yaitu 46 K.

Model 111\_12 x 3\_r1\_25 merupakan model yang sedikit lebih tebal dibandingkan dengan model 110\_12 x 2\_r1\_30. LSG model ini jauh lebih rendah karena VT-nya yang lebih kecil, tetapi nilai SHGC-nya sama. Dengan kombinasi U yang lebih rendah, model ini layak dipertimbangkan sebagai blok kaca efisien energi.

Model 118\_13 x 2\_r2\_30 memiliki nilai U sama dengan model 110\_12 x 2\_r1\_30, tetapi SHGC-nya paling kecil. Karena VT-nya hanya 0,31, LSG model ini sebesar 0,57. Model ini juga dipertimbangkan karena nilai SHGC yang minimal dan nilai VT-nya masih memenuhi persyaratan. Model-model lainnya tidak ikut dipertimbangkan karena beberapa faktor, seperti; LSG yang kecil ( $<0,5$ ) dan/atau SHGC terlalu besar ( $>0,70$ ), dan/atau VT-nya  $<0,3$ .

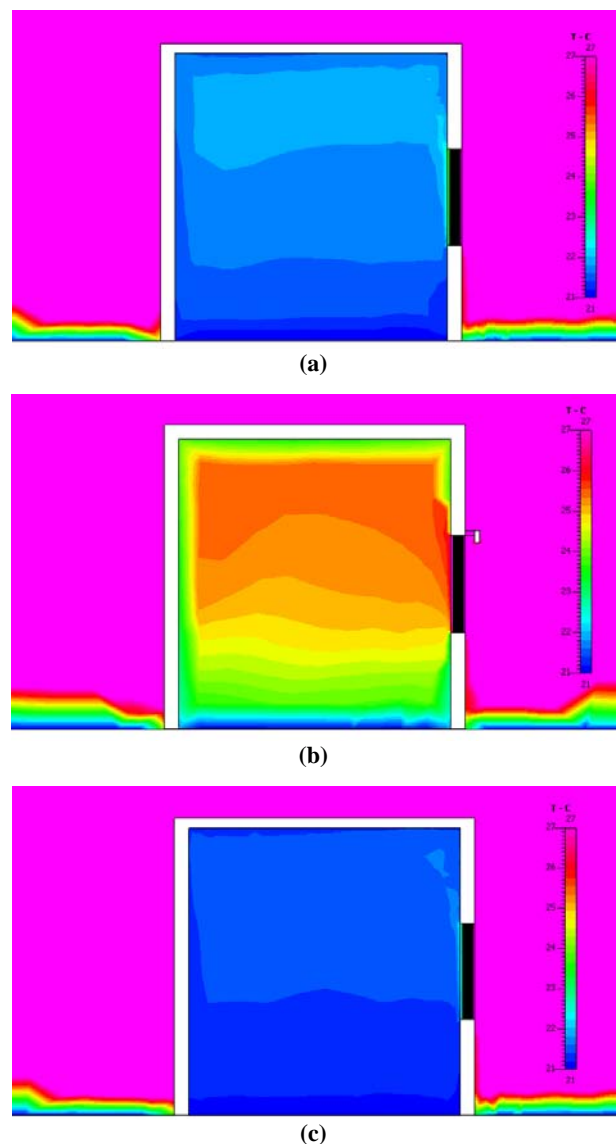
Hasil simulasi 4 jenis model bidang (blok) kaca seluas  $1 \text{ m}^2$  yang diaplikasikan pada bangunan ditunjukkan oleh Gambar 5. Aplikasi kaca bening 3 mm dengan rangka aluminium digunakan sebagai pembanding. Blok kaca dengan rongga menerus setelah dipasang pada bangunan tanpa ventilasi menghasilkan suhu ruangan yang paling tinggi setelah aplikasi kaca bening 3 mm. Aplikasi blok kaca dengan rongga tertutup menciptakan suhu ruangan yang paling rendah.

Konveksi udara dari eksterior dengan suhu yang relatif tinggi di dalam rongga menerus justru meningkatkan suhu ruangan akibat panas yang mengalir lebih cepat. Sementara itu, blok kaca tanpa rongga maupun yang berongga tertutup berfungsi sebagai insulator panas yang mencegah perambatan suhu dari eksterior ke dalam ruangan. Dengan demikian, hanya blok kaca dengan rongga tertutup yang akan diteliti.

Hasil pengujian besarnya panas yang ditransmisikan secara konduktif dan radiatif dengan simulasi Ecotect (Tabel 2) menunjukkan model 118\_13 x 2\_r2\_30 sebagai blok kaca yang paling efisien energi. Model 111\_12 x 3\_r1\_25 ternyata lebih efisien energi dibandingkan dengan model 110\_12 x 2\_r1\_30, terutama jika diaplikasikan pada dinding di sebelah utara, barat, dan timur. Jika penilaian efisiensi energi berdasarkan tingkat terang ruangan, maka model 110\_12 x 2\_r1\_30 yang paling efisien. Efisiensi pemakaian blok kaca ini mencapai 92,5-96,7 % dari energi yang dikonsumsi pada aplikasi dengan kaca 3 mm. Jika dibandingkan dengan aplikasi kaca 3 mm, ketiga model blok kaca ini sangat efisien terutama jika dipasang pada dinding sisi selatan.

Model blok kaca terpilih selanjutnya diproduksi dengan menggunakan perekat resin. Hasil uji laboratorium menunjukkan kuat desak blok kaca 118\_13 x 2\_r2\_30 sebesar 11,5 MPa dan blok kaca 111\_12 x 3\_r1\_25 mencapai 6,6 MPa.

Hasil simulasi yang telah dilakukan masih terbatas untuk beberapa asumsi sebagai berikut: baru menunjukkan nilai VT maksimum dan nilai SHGC maksimum, belum memperhitungkan pengaruh perekat yang kemungkinan akan menurunkan VT dan SHGC blok kaca. Dengan demikian, produk kaca yang dihasilkan kemungkinan akan mengalami penurunan nilai VT, SHGC, dan U. Penurunan secara signifikan kemungkinan akan terjadi pada SHGC akibat keberadaan perekat sebagai penyerap dan penahan aliran panas.



Gambar 5. Suhu Ruang Akibat Pengaruh Aplikasi Blok Kaca Tanpa Rongga (a), dengan Rongga Menerus (b), dan dengan Rongga Buntu (c)

Tabel 2. Hasil Simulasi Aplikasi Tiga Model Blok Kaca pada Ruang 3 m x 3 m x 3 m

Model	$Q_f$ (W)	$Q_s$ (W)	$Q_{total}$ (W)	E (lux)	$Q_{lampu}$ (W)	$Q_{total} + Q_{lampu}$ (W)	Efisiensi (%)
	a	b	c=a+b	d	e	f=c+e	$g=(f_{3mm}-f_{model})/f_{3mm}$
Menghadap ke utara							
Kaca bening 3 mm	20,49	96,94	117,43	349,00	0,00	117,43	0,0
110_12x2_r1_30	0,54	2,24	2,77	28,42	5,83	8,60	92,7
111_12x3_r1_25	0,58	2,17	2,75	17,98	6,02	8,77	92,5
118_13x2_r2_30	0,58	1,93	2,52	7,47	6,21	8,73	92,6
Menghadap ke barat							
Kaca bening 3 mm	20,50	96,46	116,96	349,00	0,00	116,96	0,0
110_12x2_r1_30	0,54	2,21	2,80	28,42	5,83	8,62	92,6
111_12x3_r1_25	0,58	2,14	2,72	17,98	6,02	8,74	92,5
118_13x2_r2_30	0,58	1,91	2,49	7,47	6,21	8,70	92,6
Menghadap ke timur							
Kaca bening 3 mm	20,25	118,90	139,15	349,00	5,83	139,15	0,0
110_12x2_r1_30	0,54	2,86	3,44	28,42	6,02	9,27	93,3
111_12x3_r1_25	0,58	2,81	3,39	17,98	6,02	9,41	93,2
118_13x2_r2_30	0,58	2,59	3,21	7,47	6,21	9,42	93,2
Menghadap ke selatan							
Kaca bening 3 mm	20,46	220,41	240,87	349,00	0,00	240,87	0,0
110_12x2_r1_30	0,56	1,61	2,17	28,42	5,83	8,00	96,7
111_12x3_r1_25	0,59	1,67	2,25	17,98	6,02	8,27	96,6
118_13x2_r2_30	0,59	1,34	1,93	7,47	6,21	8,14	96,6

#### 4. Simpulan

Penerapan rongga pada blok kaca merupakan cara efektif untuk menurunkan nilai U dan SHGC kaca dengan penurunan VT yang lebih kecil dibandingkan dengan penambahan ketebalan kaca. Hal yang perlu diperhatikan dalam merancang blok kaca yang rendah energi adalah: (1) perbandingan antara ketebalan rongga dan kaca, (2) jumlah rongga dan tebal rongga dengan mempertimbangkan aspek mekanis blok kaca dan penurunan VT dan U serta kecepatan aliran udara di dalam rongga. Studi ini menghasilkan model blok kaca dengan  $U = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $VT = 0,56$  dan  $SHGC = 0,65$  yang memiliki efisiensi hingga 96,7% pemakaian energi pada aplikasi dengan kaca 3 mm. Simulasi dilakukan tanpa memodelkan perekat. Diperkirakan keberadaan perekat antar lapisan kaca pada blok kaca yang nyata akan menurunkan VT maupun SHGC blok kaca dengan penurunan yang cukup besar pada nilai SHGC-nya.

#### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana berkat dukungan finansial dari DP2M-DIKTI melalui skim Hibah Bersaing Tahun I/2009 dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: 055/SP2H/PP/DP2M/IV/2009 Tanggal 6 April 2009.

#### Daftar Acuan

- [1] British Standards Institute, PAS 102: Specification For Processed Glass for Selected Secondary end Markets, *wn.com/British\_Standard\_Institute*, 2005.
- [2] G. Milne, C. Reardon, Embodied Energy, <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs52.html>, 2008
- [3] ASHRAE, ASHRAE Handbook: Fundamental, ASHRAE, Atlanta, 2001, p.30.
- [4] Mulia Glassblock, Architectural Specification, [www.muliainc.com/glassblock/products/MuliaGlassblockArchSpec.pdf](http://www.muliainc.com/glassblock/products/MuliaGlassblockArchSpec.pdf), 2009.
- [5] P. Corning, LightWise Architectural Systems Energy Efficient Glass Block Panels, [http://www.twincitiesglassblock.com/images/GB-185\\_1-5.pdf](http://www.twincitiesglassblock.com/images/GB-185_1-5.pdf), 2010.
- [6] P.R. Atherton, Cold Seal Glass and Energy-Efficient Panel, US20100139191, 2010.
- [7] International Institute of Energy Conservation & USAID, Energy Conservation Building Code 2006, Bureau of Energy Efficiency, New Delhi, 2006, p.67.
- [8] A. Gustavsen, J.V. Thue, J. Building Phys. 30/3 (2007) 217.
- [9] E. Ng, Conf. Proc. of the IBPSA Conf., Rio de Janeiro, 2001, p.1215.

- [10] C.F. Reinhart, M. Andersen, J. Energy Build 38/7 (2006) 890.
- [11] Ecotect v.5.6, User Manual, <http://www.squil.com>, 2008.
- [12] P. Satwiko, N. Locke, M. Donn, Proc. of the 32<sup>nd</sup> Annual Conf. of the Australia and NZ ASA, Wellington, 1998.
- [13] J.M. Horan, D.P. Finn, Proc. of Int. Conf. Passive Low Cooling for the Built Environment, 2005, p.53.
- [14] M.J. Braun, V.V. Kundriavtsev, B.M. Steinetz, M.P. Proctor, J. Rotating Mach. 9/3 (2003) 171.