

PROCEEDING

National Conference on  
*Green Technology  
for Better Future*

Editor: Fachrur Rozi, Romaidi, M. Jamhuri, Ernaning, Andi Irawan

Seminar Nasional Green Technology  
Malang, 20 November 2010  
Fakultas Sain dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang



## KATA PENGANTAR

Seminar Nasional *Green Technology for Better Future* yang diselenggarakan oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang pada tanggal 20 November 2010 merupakan bagian dari upaya yang luas akan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan. Seminar ini mencakup berbagai isu pelestarian lingkungan hidup di berbagai aspek keilmuan dan teknologi yang tengah berkembang selama beberapa kurun waktu terakhir, di antaranya adalah pemanfaatan sumber-sumber energi alternatif, inovasi-inovasi teknologi tepat guna dan ramah lingkungan, penerapan konsep-konsep keberlanjutan di dalam penelitian, pendidikan, dan pembangunan, serta kebijakan-kebijakan berwawasan lingkungan dalam bidang ekonomi, sosial, politik, dan sebagainya.

Makalah utama yang disampaikan oleh lima pembicara terundang yang mewakili beberapa topik pilihan seminar ini yaitu green nanotechnology, green building, green physics, green chemistry, biotechnology dan social ekonomi yang berkaitan dengan green technology.

Prosiding Seminar Nasional *Green Technology for Better Future* ini adalah salah satu bentuk pertanggungjawaban untuk menyebarluaskan dan menyumbangkan hasil-hasil pemikiran dan penelitian yang terangkum dalam makalah-makalah yang telah disajikan di sesi panel seminar nasional ini dalam bentuk presentasi dan poster. Dengan demikian, diharapkan hasil-hasil pemikiran dan penelitian dari berbagai pihak ini dapat memiliki manfaat yang jauh lebih luas bagi upaya-upaya pencegahan dan perbaikan kerusakan lingkungan hidup di kalangan para akademisi, pemegang kebijakan, pelaku usaha, dan masyarakat secara umum.

Hormat kami,  
Panitia

## TIM REVIEWER

Prof. Drs. Sutiman B. Sumitro, SU., D.Sc  
Dr. Agus Mulyono, M.Kes  
Dr. Eko Budi Minarno, M.Pd  
Dr. Cahyo Crysdiyan, MCS  
Fachrur Rosi, M.Si  
Tri Kustono Adi, M.Sc  
Ernaning Setyawati, M.Si  
Novi Avicena, M.Si  
Abdul Azis, M.Si  
Mohammad Jamhuri, M.Si  
Yulia Eka Putrie, M.T  
Luluk Maslucha, M.T

## DAFTAR ISI

Kata Pengantar .....	i
Tim Reviewer .....	ii
Daftar Isi.....	iii

**A. Keynote Speaker**

INTERPRETATION OF BALANCED ACT IN ECOLOGICAL CONCEPT <i>Akira KIKUCHII, and Romaidi</i> .....	A-1
MEMBANGUN MASYARAKAT INDONESIA ILMIAH, TEKNOLOGI DAN INDUSTRI GREEN TECH LIFE STYLE (GTLS) INSPIRASI DARI JEPANG DR Hc Anni Iwasaki.....	A-5

**B. Green Architecture**

FAILURE RISK ANALYSIS OF STRUCTURE SYSTEM OF WOOD BEAM WITH RELIABILITY BASED METHOD Agung Sedayu.....	B-1
APLIKASI <i>GREEN</i> ARSITEKTUR PADA HUNIAN DI DAERAH TROPIS LEMBAB KOTA MALANG AB. Mappaturi .....	B-8
<i>GREEN GLASS BLOCK</i> DARI LIMBAH KACA DENGAN APLIKASI RONGGA DAN <i>SANDWICH</i> F. Binarti, dkk.....	B-16
PENERAPAN KONSEP <i>GREEN ARCHITECTURE</i> PADA ARSITEKTUR VERNAKULAR KAMPUNG NAGA Luluk Maslucha .....	B-23

**C. Biotechnology**

PEMANFAATAN FESES SAPI SEBAGAI SUMBER INOKULUM PADA RANSUM KOMPLIT DARI LIMBAH PERKEBUNAN KELAPA SAWIT DAN AGROINDUSTRI UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS PAKAN D. Febrina, T. Adelina dan I. Tauhid.....	C-1
ISOLASI DAN PURIFIKASI SEL MESOFIL DAUN PEGAGAN ( <i>Centella asiatica, L.</i> ) URBAN UNTUK PENYEDIAAN EKSPLAN BAGI KULTUR SUSPENSII SEL E. Prihastanti, Y. Nurchayati, N. Setiari, E.D. Hastuti .....	C-6
OPTIMASI MEDIA TUMBUH PADA PERBANYAKAN TUNAS LATERAL TEBU <i>Saccharum officinarum, L.</i> SECARA IN VITRO Hilda Safitri dan Bambang Sugiharto .....	C-10
POTENSI EKSTRAK ALGA MERAH <i>Euचेuma spinosum</i> SEBAGAI BAHAN ANTIBAKTERI Anna Safitri, Anna Roosdiana, Wahyunnisa .....	C-14
ISOLASI DAN SKRINING JAMUR TANAH PENGHASIL XILANASE Elisa Nurnawati, Sebastian Margino, Erni Martani, Sarto.....	C-18
KUALITAS JERAMI PADI YANG DIFERMENTASI MENGGUNAKAN BAKTERI DAN ENZIM SELULOLITIK ASAL PENCERNAAN KEONG EMAS ( <i>Pomacea canaliculata</i> )	

# GREEN GLASS BLOCK DARI LIMBAH KACA DENGAN APLIKASI RONGGA DAN SANDWICH

F. Binarti<sup>1</sup>, A.D. Istiadji<sup>2</sup>, P. Satwiko<sup>3</sup>, P.T. Iswanto<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta

e-mail: [floriberta\\_binarti@yahoo.com](mailto:floriberta_binarti@yahoo.com)

<sup>4</sup> Jurusan Teknik Mesin FT-UGM

**Abstrak**—*Green glass block* merupakan upaya pemanfaatan limbah kaca dengan metode laminasi yang ramah lingkungan. *Sandwich* dan rongga diaplikasikan untuk menciptakan bahan berperforma energi tinggi. Metode analitis, simulasi dan uji laboratorium dipilih sebagai pendekatan desain. Secara analitis bahan baru ini memiliki transmitansi panas  $< 3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Hasil uji laboratorium menunjukkan transmisi cahaya tampaknya (VT) sebesar 0,43-0,55 dengan transmisi radiasi matahari (SHGC) sebesar 0,10-0,25. Dengan kombinasi nilai VT dan SHGC tersebut *green glass block* termasuk efisien energi.

**Kata kunci:** *green glass block*, performa energi, rongga, *sandwich*

## PENDAHULUAN

Sebagai bahan konstruksi yang dihasilkan dari sumber daya tak terbarui (silica) melalui proses pemanasan pada suhu tinggi, kaca termasuk bahan dengan kandungan energi tinggi ( $37550 \text{ MJ/m}^3$ ). Pemanfaatan limbah kaca menjadi *glass block* merupakan solusi pengurangan dampak kerusakan lingkungan dan beban lingkungan akibat penimbunan. Laminasi dipilih untuk menekan kandungan energi yang dibutuhkan pada proses produksi. *Glass block* dengan metode *sandwich* sangat mungkin diterapkan sebagai bentuk laminasi limbah kaca dengan teknologi yang sederhana, sehingga dengan mudah diaplikasikan langsung di setiap bengkel kaca yang menghasilkan banyak limbah kaca. Pemilihan perekat kaca menjadi salah satu kunci metode *sandwich*.

Tantangan untuk menciptakan bahan konstruksi baru yang “green” berikutnya adalah menghasilkan *glass block* dengan performa energi yang tinggi. Performa energi fenestrasi seperti *glass block* ditentukan oleh kombinasi antara nilai transmitansi panas (U) dan transmisi radiasi matahari (Solar Heat Gain Coefficient = SHGC) yang rendah dan transmisi cahaya tampak (Visible light Transmittance = VT) yang tinggi. Rasio antara VT dan SHGC yang disebut sebagai *Light to Solar Gain* (LSG) digunakan untuk menentukan nilai optimal performa energi fenestrasi. Untuk daerah tropis lembab ditetapkan  $\text{LSG} \geq 3,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $\text{SHGC} \leq 0,25$  (IIEC, 2006). Sebuah fenestrasi termasuk berperforma energi tinggi jika memiliki  $\text{LSG} \geq 1,4$  (ASHRAE, 2000). Suhu

permukaan interior bahan juga penting untuk dipertimbangkan karena akan menghasilkan perbedaan efek kenyamanan pada interior (ASHRAE, 2000). Diharapkan aplikasi *glass block* berperforma energi yang tinggi akan mencegah peningkatan efek rumah kaca sebagaimana yang terjadi pada bangunan dengan aplikasi kaca biasa.

Metode *sandwich* memungkinkan terciptanya bahan baru dengan U dan SHGC yang rendah. Jumlah lapisan kaca dan lapisan perekat (*interlayer*) akan meningkatkan kemampuan menyerap radiasi matahari. Karena resistansi panas yang tinggi dari ruang antara lapisan kaca, hampir seluruh radiasi yang diserap oleh permukaan luarnya akan dilepaskan ke eksterior (Powles dkk., 2002). Untuk mengatasi penurunan VT akibat penerapan *sandwich* diterapkan rongga. Rongga merupakan cara efektif untuk menghasilkan bahan dengan U rendah (ASHRAE, 2000), tetapi dengan penurunan VT yang minimal. Posisi dan lebar rongga memengaruhi perpindahan panas yang melewati kaca (Hong dkk., 2006), di samping ditentukan juga oleh konduktivitas panas rongga (Devia dkk., 2000). Optimasi jumlah lapisan, posisi dan geometri rongga merupakan permasalahan di dalam mendesain *green glass block*. Untuk memperoleh model *glass block* dengan performa energi tinggi dilakukan proses desain dengan metode analitis, simulasi dan uji laboratorium.

## METODE, ALAT, DAN BAHAN

Identifikasi limbah kaca yang dihasilkan oleh bengkel kaca merupakan tahap awal dari penelitian ini. Tahap berikutnya adalah merancang beberapa model *glass block* berdasarkan pertimbangan dari segi mekanis, kemungkinan nilai U, VT, harga dan tebal konstruksi dinding yang umum diterapkan. Desain *glass block* dibuat dengan variasi tebal, posisi, jumlah dan tebal rongga. Masing-masing model dibuat dalam 2 variasi, yaitu: dengan rongga terbuka dan rongga tertutup.

Penentuan perekat kaca dilakukan pada tahap ketiga dengan mempertimbangkan tingkat transparansi dan tampilan, daya rekat atau aspek mekanis, harga, kemudahan diperoleh di pasaran, serta kemudahan proses laminasi dan dampak lingkungan yang ditimbulkan. Beberapa jenis perekat yang dapat dikaji adalah putih telur, *silicon sealant* dan resin.

Pada tahap keempat dilakukan perkiraan nilai U masing-masing model secara analitis dengan rumus (1).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{f_0} + \frac{b_1}{k_1} + R + \frac{b_2}{k_2} + \frac{1}{f_i}} \dots\dots\dots (1)$$

Konduktansi permukaan luar dinyatakan dalam  $f_0$ . Untuk daerah tropis lembab dengan kecepatan angin rata-rata  $f_0$  sebesar 3 m/det sekitar 15 W/m<sup>2</sup>.K.  $f_i$  untuk menyatakan konduktansi permukaan dalam/dinding ( $f_i$ ) yang besarnya 8,12 W/m<sup>2</sup>.K. Ketebalan lapisan, baik kaca maupun perekat, dilambangkan sebagai  $b$  dengan konduktivitas termal bahan sebesar  $k$ .  $R$  digunakan untuk menyatakan resistansi termal rongga udara. Pada tahap ini juga dilakukan analisa VT, SHGC dan suhu permukaan interior dan eksterior dengan metode simulasi. Simulasi dengan program Ecotect-Radiance digunakan untuk mengetahui perkiraan nilai VT model. Ecotect-Radiance bekerja berdasarkan algoritma *ray-tracing*. Dengan metode pelacakan jejak pancaran cahaya, tingkat terang dan pantulan pada permukaan yang spekulat dapat dihitung secara akurat (Ng, 2001 dan Reinhart, 2006). Kelemahan metode ray tracing terletak pada kemampuan di dalam menganalisis *interreflection* (Ward dkk., 1988) yang sering terjadi pada kaca multilapis.

Dengan membandingkan besarnya tingkat iluminansi cahaya matahari pada titik di dalam kotak hitam dof (daya pantul  $\approx 0$ ) yang ditutup oleh model *glass block* pada posisi horizontal dengan titik di dalam kotak hitam dof tanpa kaca maka diperoleh VT model *glass block* tersebut. *Glass block* dimodelkan sebagai gabungan permukaan kaca yang memiliki properti optis dan termal yang sama dengan kaca bening 5 mm yang membentuk tiga (3) dimensi dengan tebal 5 mm. Keberadaan perekat diabaikan.

Kondisi batas simulasi pada 2 Maret pukul 12:00 dengan tingkat terang langit sebesar 9897 lux, dengan demikian VT yang dihasilkan adalah nilai maksimum. Nilai VT hasil simulasi selanjutnya divalidasi terhadap prosentase pergeseran antara nilai VT pada kaca 3 mm, 5 mm dan beberapa lapisan kaca yang disimulasikan dengan program yang sama terhadap nilai VT hasil pengukuran lapangan.

Pemodelan untuk simulasi SHGC sama dengan pemodelan untuk analisis VT. Perkiraan nilai SHGC diperoleh melalui simulasi beban panas radiasi ( $Q_g$ ) dengan menggunakan fasilitas *Losses and Gains* pada program Ecotect yang bekerja dengan *Admittance method*. Metode ini menerapkan konsep variasi siklus yang sangat membantu di dalam menganalisa termal bangunan dengan perbedaan suhu dan aliran energi pada kondisi “*steady state*”, seperti ruangan yang dikondisikan secara mekanis.

Nilai SHGC dihitung dengan rumus (2).

$$SHGC_{glassblock} = \frac{Q_{g-glassblock}}{Q_{g-k.bening\ 3mm}} * 0,87 \dots\dots\dots (2)$$

Besarnya  $Q_g$  *glassblock* diperoleh dari hasil simulasi panas yang ditransmisikan oleh model *glass block* ( $Q_g$ ) yang ditempatkan pada dinding ruangan adiabatik.  $Q_g$  kaca3mm merupakan  $Q_g$  yang ditransmisikan oleh kaca bening 3 mm pada model ruang yang sama. Angka 0,87 merupakan nilai SHGC kaca bening 3 mm. Kondisi batas yang dipilih adalah saat radiasi matahari maksimum, sehingga SHGC yang dihasilkan merupakan nilai maksimum.

Gradien suhu yang disimulasikan oleh CFD-ACE digunakan untuk menunjukkan suhu permukaan material sebagai parameter akhir untuk mempertimbangkan model yang akan diproduksi. Simulasi CFD memungkinkan untuk melihat efek konveksi yang terjadi di dalam model *glass block*, sehingga analisis CFD dapat digunakan untuk melihat efek model rongga terhadap suhu permukaan bahan maupun suhu interior bangunan. Banyak studi yang membuktikan keakurasian hasil simulasi CFD, salah satunya studi dengan model turbulen standard  $k-\epsilon$  (Satwiko dkk.,1998).

Simulasi CFD dilakukan dengan kondisi batas yang sesuai dengan kondisi termal kota Yogyakarta. Radiasi matahari yang digunakan sebesar 540 W/m<sup>2</sup>, dengan kecepatan angin sebesar 0,1 m/s dan suhu rata-rata sebesar 26,83 °C. Suhu rata-rata terendah dipilih untuk melihat perbedaan efek konveksi antar model secara lebih jelas.

Tahap terakhir berupa pengujian laboratorium/lapangan yang dilakukan setelah model dengan performa energi yang sesuai baku diproduksi. Uji laboratorium dilakukan untuk mengetahui kuat tekan, VT, SHGC dan U bahan baru. Penelitian ini baru pada tahap pengujian VT dan SHGC. Meskipun demikian dari hasil uji VT dan SHGC tingkat efisiensi energi *glass block* yang baru sudah dapat diketahui. Hasil simulasi keseimbangan energi dengan Ecotect yang dilakukan pada tiga model yang dinilai paling efisien energi menunjukkan bahwa nilai VT dan SHGC lebih berpengaruh pada panas yang ditransmisikan melalui kulit bangunan dan lampu sebagai pelengkap pencahayaan alami daripada nilai U-nya (Binarti dkk., 2010).

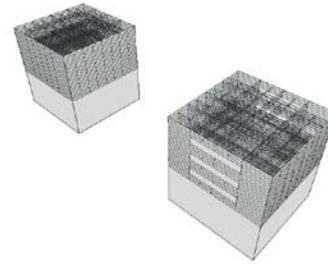
Pengujian VT menggunakan metode yang sama seperti pemodelan Ecotect untuk menentukan nilai VT. Hanya saja sumber cahaya yang digunakan adalah lampu Spotone PAR 80W yang ditempatkan di dalam kotak hitam dof. Karena lampu memiliki tingkat terang yang konstan, pengukuran cukup dilakukan pada satu posisi saja. Tingkat terang yang ditransmisikan melalui *glass block* maupun tanpa *glass block* diukur dengan Luxmeter Lutron LX-101. VT *glass block* diperoleh dari perbandingan tingkat terang yang dibaca oleh luxmeter setelah melewati *glass block* terhadap tingkat terang tanpa *glass block*. Luxmeter Lutron LX-101 memiliki deviasi tingkat akurasi sebesar 5%.

Pengujian SHGC dilakukan dengan menggunakan *Solar Transmission and Power Meter Model SP2065*.

Alat ini dapat menunjukkan nilai SHGC secara langsung setelah dilakukan kalibrasi sendiri (*self calibration*). SP2065 diposisikan dengan sensor mengarah ke *glass block* dengan lampu infra merah di bawahnya pada jarak minimal 46 cm dari lampu. Posisi alat terhadap lampu dinyatakan valid setelah pada layar menunjuk angka P100 saat tanpa *glass block*. Dengan demikian tingkat akurasi hasil pengukuran ditentukan oleh *control microprocessor* dan konsistensi posisi alat.

## HASIL DAN DISKUSI

Hasil identifikasi limbah kaca menunjukkan bahwa kaca bening tebal 3 mm dan 5 mm adalah jenis limbah kaca yang paling banyak ditemukan selain kaca bertekstur warna hijau, biru dan merah dengan ketebalan 3 mm. Selanjutnya, pada tahap kedua dihasilkan 12 model *glass block* dari limbah kaca bening tebal 5 mm. Kaca dengan tebal 3 mm tidak dipilih karena akan membutuhkan lebih banyak tenaga kerja dan perekat, serta menghasilkan nilai VT yang lebih rendah untuk tebal *glass block* yang sama. Model *Glass block* tersusun atas beberapa lembaran kaca dan rongga. Setiap lembaran kaca merupakan rangkaian potongan kaca dengan susunan yang saling menutup antara lapisan satu dengan lapisan di sampingnya agar tidak terjadi siar tegak (**Gambar 1**). *Glass block* dengan luas permukaan 20 cm x 20 cm dipertimbangkan berdasarkan aspek mekanis (kemampuan mengikat antar mozaik kaca) dan optis (VT). Luasan yang lebih kecil akan menurunkan VT. Sebaliknya, luasan lebih besar menurunkan kekuatan mekanisnya.



**Gambar 1.** Potongan salah satu model *glass block* yang dimodelkan dengan Ecotect

Laminasi potongan kaca menggunakan perekat resin, berdasarkan pertimbangan sebagai berikut:

- Kuat geser resin sebesar 14-50 MPa sangat memungkinkan untuk membentuk hasil perekatan yang kuat secara struktural. Angka ini jauh lebih besar dibandingkan dengan putih telur yang hanya sebesar 0,36 MPa.
- Hasil perekatan yang transparan dan lebih bersih dibandingkan dengan putih telur maupun *silicon sealant*.
- Proses perekatan yang sederhana dan murah dibandingkan dengan proses perekatan dengan *silicon sealant*.
- Ketahanan terhadap kondisi cuaca yang lebih baik daripada putih telur.
- Harga yang terjangkau.

Perkiraan nilai U secara analitis maupun simulasi VT, SHGC dan suhu permukaan *glass block* menghasilkan performa energi yang dideskripsikan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Performa energi model *glass block* yang ditinjau dari U, suhu permukaan, VT, SHGC dan LSG

Kode model	Rongga tertutup							Rongga terbuka						
	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	2,53	77,5	31,5	46	0,52	0,65	0,80	2,24	74	29,5	44,5	0,52	0,64	0,81
111_12x3_r1_25	2,47	65,5	30	35,5	0,41	0,65	0,63	2,20	64,5	28	36,5	0,41	0,64	0,64
112_12x2_r1_40	3,16	78	30	48	0,52	0,74	0,70	3,00	72,5	28	44,5	0,52	0,73	0,71
113_12x3_r1_35	3,09	67	29	38	0,40	0,73	0,55	2,89	64	28	36	0,40	0,71	0,56
114_14x2_r3_10	2,49	75	28	47	0,40	0,71	0,56	2,10	70	28	42	0,31	0,69	0,45
114_13x2_r2_20	2,24	77,5	28	49,5	0,40	0,72	0,56	1,90	72	28	44	0,40	0,70	0,57
115_13x3_r2_15	2,21	67	28	39	0,28	0,70	0,40	1,88	62	27,5	34,5	0,28	0,68	0,41
115_12x3_r1_45	2,98	67	28	39	0,40	0,71	0,56	2,79	63,5	27,5	36	0,40	0,69	0,58
118_13x2_r2_30	2,53	77	27	50	0,31	0,57	0,54	2,24	72	27	45	0,40	0,56	0,71
119_13x3_r2_25	2,47	67	27	40	0,27	0,59	0,46	2,19	64	27	37	0,27	0,56	0,48
120_14x2_r3_20	2,24	78	27	51	0,31	0,67	0,46	1,90	73	27	46	0,31	0,65	0,48
121_14x3_r3_15	2,21	65	27	38	0,19	0,66	0,29	1,88	62,5	27	35,5	0,19	0,64	0,30
<b>Minimum</b>	2,21	65	27	35,5	0,19	0,57	0,29	1,88	62	27	34,5	0,19	0,56	0,30
<b>Maksimum</b>	3,16	78	31,5	51,0	0,52	0,74	0,80	3,00	74	29,5	46	0,52	0,73	0,81

Keterangan:

U dalam W/m<sup>2</sup>.K; T<sub>s</sub> = suhu permukaan eksterior (°C); T<sub>i</sub> = suhu permukaan interior (°C); ΔT = perbedaan antara T<sub>s</sub> dan T<sub>i</sub>

Kode model: contoh untuk 110\_12x2\_r1\_30 berarti jumlah lembar 10 (110), dengan susunan lapisan kaca di antara rongga sebanyak 2 lapis dan jumlah lembar adalah 2 per lapis (12x2). Rongga berjumlah 1 dengan tebal 30mm (r1\_30).

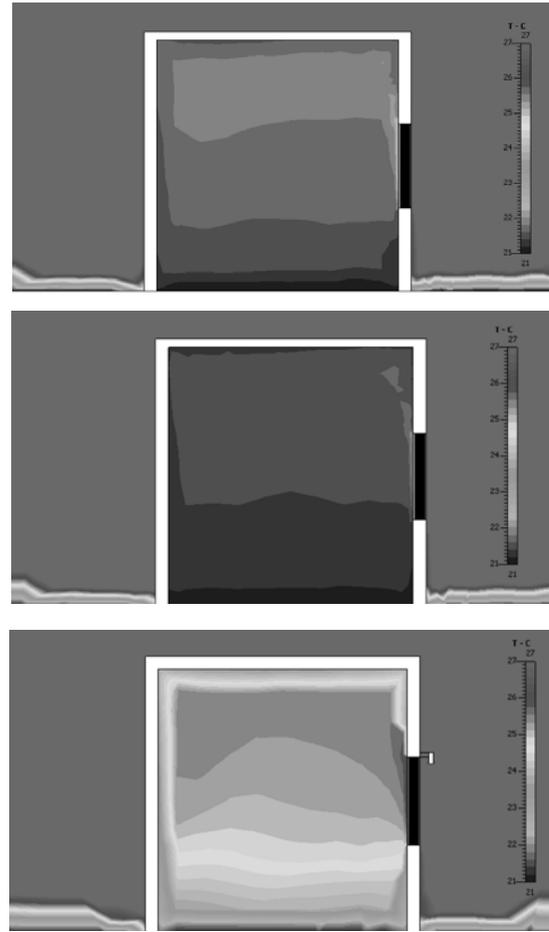
Semua model memiliki U yang memenuhi baku nilai U untuk daerah tropis lembab. Jika dibandingkan dengan perkiraan nilai U yang pernah diteliti sebelumnya (Binarti dkk., 2010), resin mampu menurunkan nilai U *glass block* 2-3%. Semakin banyak jumlah lapisan kaca, perbedaan nilai U semakin besar. Hal ini disebabkan konduktivitas panas resin (0,77 W/m.K) lebih kecil dibandingkan dengan konduktivitas kaca (1,05 W/m.K). Rongga mampu menurunkan U secara efektif seperti yang terjadi pada model 110\_12x2\_r1\_30 dan 111\_12x3\_r1\_25. Meskipun jumlah lapisan kacanya relatif sedikit, prosentase rongga yang cukup besar menghasilkan *glass block* dengan U yang rendah.

Sementara, pada hasil simulasi SHGC semua model memiliki SHGC yang masih di atas baku. SHGC yang relatif rendah hanya pada model 110\_12x2\_r1\_30, 111\_12x3\_r1\_25, dan model-model lain dengan jumlah lembaran kaca  $\geq 18$  lembaran. Kombinasi jumlah lembaran, tebal dan jumlah rongga harus diperhatikan untuk menjaga aliran panas secara radiasi yang akan meningkat pada ruang rongga *glass block*. Rongga tunggal yang terlalu lebar ( $> 30$  mm) kurang tepat diaplikasikan pada *glass block* yang tipis ( $< 18$  lembaran). Rongga tipis berjumlah  $> 1$  juga kurang tepat diaplikasikan untuk *glass block* yang tipis dengan rongga yang lebih tebal daripada lapisan kacanya.

Model dengan kombinasi SHGC dan VT yang paling optimal dicapai oleh 110\_12x2\_r1\_30. VT yang tinggi berpengaruh cukup besar dalam menentukan tingkat efisiensi energi bangunan yang diaplikasikan, karena penambahan lampu yang harus dipasang untuk menutupi kekurangan pencahayaan alami akibat jendela dengan VT rendah akan mengkonsumsi energi dan menghasilkan panas yang cukup besar (Binarti dkk., 2010).

*Glass block* yang tebal akan menciptakan suhu permukaan interior yang lebih rendah. Suhu permukaan eksterior ditentukan oleh ketebalan lapisan kaca antara eksterior dan rongga pertama. Lapisan yang terdiri dari 3 lembaran kaca memiliki suhu permukaan eksterior yang lebih rendah daripada yang terdiri dari 2 lembaran kaca. Aplikasi rongga terbuka akan menurunkan suhu permukaan eksterior dan nilai U secara signifikan. Penurunan suhu permukaan interior dan SHGC terjadi pada model *glass block* dengan rongga terbuka secara tidak signifikan. Pembukaan rongga juga tidak mengubah nilai VT-nya.

Studi simulasi aplikasi *glass block* tanpa rongga, dengan rongga terbuka dan rongga tertutup pada bangunan menunjukkan bahwa model dengan rongga tertutup akan menghasilkan suhu ruangan yang paling rendah (**Gambar 2**). Aplikasi model dengan rongga terbuka justru menciptakan suhu ruangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan aplikasi model tanpa rongga. Dengan demikian *glass block* yang akan diproduksi adalah yang berongga tertutup.



**Gambar 2.** Suhu interior akibat aplikasi *glass block* tanpa rongga (atas), dengan rongga tertutup (tengah) dan dengan rongga terbuka (bawah)

Meskipun SHGC dan LSG semua model tidak memenuhi baku, tetap dilakukan pemilihan model untuk diproduksi dan diuji laboratorium. Karena model simulasi SHGC dibuat dengan mengabaikan perekat, besar kemungkinan SHGC hasil uji laboratorium akan lebih rendah.

110\_12x2\_r1\_30 dipilih karena memiliki LSG dan VT tertinggi, dengan SHGC yang relatif rendah. 118\_13x2\_r2\_30 juga akan diproduksi karena memiliki SHGC dan suhu permukaan interior terendah. Untuk menurunkan suhu permukaan eksterior kedua model yang masih relatif tinggi dapat dilakukan penambahan 1 lembaran kaca pada sisi eksterior. Hasil simulasi CFD menunjukkan penambahan 1 lembaran kaca pada sisi eksterior mampu menurunkan suhu permukaan eksterior hingga sekitar  $10^{\circ}\text{C}$ .

Setiap model diuji secara laboratorium minimal 4-5 kali untuk setiap jenis pengujian. Hasil pengujian VT ditampilkan pada **Tabel 2**. Kolom kalibrasi menunjukkan hasil kalibrasi yang dilakukan dengan mengalikan hasil pengujian dengan perbandingan antara VT kaca bening 5 mm yang sudah dibakukan (0,88) dan VT kaca bening 5 mm hasil pengujian dengan alat dan pada kondisi yang sama.

Tabel 2. Hasil pengujian VT dan kalibrasinya

Model	Pengukuran ke-	$E_0$	$E_{\text{glass block}}$	VT	VT hasil kalibrasi
110_12x2_r1_30	1	2900	1600	0,55	0,57
	2	2200	1200	0,55	0,56
	3	2700	1500	0,56	0,57
	Rata-rata			<b>0,55</b>	<b>0,57</b>
118_13x2_r2_30	1	2900	1300	0,45	0,46
	2	1900	800	0,42	0,43
	3	2600	1100	0,42	0,44
	Rata-rata			<b>0,43</b>	<b>0,44</b>
Kaca bening 5 mm	1	2900	2500	0,86	
	2	2500	2200	0,88	
	3	2700	2200	0,82	
	Rata-rata			0,85	0,88

Deviasi hasil pengujian VT relatif kecil, yaitu 0,5% untuk 110\_12x2\_r1\_30 dan 1,5% untuk 118\_13x2\_r2\_30. Hasil pengujian VT model 110\_12x2\_r1\_30 (0,57) bergeser 9% terhadap hasil simulasi (0,52). Sementara hasil pengujian VT model 118\_13x2\_r2\_30 (0,44) mengalami pergeseran 30% terhadap hasil simulasinya (0,31). Angka ini cukup besar mengingat model yang disimulasikan tanpa penambahan lapisan kaca utuh (1 cm lebih tipis) dan mengabaikan perekat. Hasil simulasi yang cenderung rendah kemungkinan disebabkan oleh kekurangan metode *ray-tracing* dalam menganalisis *interreflection* yang banyak terjadi pada kaca multilapis. Konstruksi model potongan kaca sebagai rangkaian enam bidang yang membentuk potongan kaca memungkinkan penurunan tingkat terang yang ditransmisikan oleh model *glass block*.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian SHGC yang dilengkapi dengan hasil kalibrasi.

Tabel 3. Hasil pengujian SHGC dan kalibrasinya

Model	Pengukuran ke-	SHGC	SHGC hasil kalibrasi
110_12x2_r1_30	1	0,20	0,25
	2	0,21	0,27
	3	0,18	0,23
	4	0,18	0,23
	5	0,20	0,25
	Rata-rata		<b>0,19</b>
118_13x2_r2_30	1	0,10	0,13
	2	0,08	0,10
	3	0,07	0,09
	4	0,08	0,10
	5	0,08	0,10
	Rata-rata		<b>0,08</b>
Kaca bening 5 mm	1	0,63	
	2	0,64	
	3	0,64	
	4	0,65	
	5	0,71	
	Rata-rata		0,65

Kalibrasi dilakukan dengan mengalikan hasil pengujian dengan perbandingan antara SHGC kaca bening 5 mm yang dibakukan (0,83) dan SHGC kaca bening 5 mm hasil pengujian dengan alat yang sama dan pada kondisi yang sama.

Pengujian SHGC sebanyak 5 kali untuk setiap model menunjukkan hasil yang konsisten. Besarnya deviasi untuk 110\_12x2\_r1\_30 sebesar 1,3% dan untuk 118\_13x2\_r2\_30 sebesar 1,1%. SHGC kedua model memenuhi persyaratan SHGC untuk bangunan efisien energi di tropis lembab.

Dibandingkan dengan hasil simulasi SHGC (0,65 untuk 110\_12x2\_r1\_30 dan 0,57 untuk 118\_13x2\_r2\_30), hasil pengujian di laboratorium bergeser sebesar 62% hingga 82%. Pergeseran nilai yang besar ini disebabkan pengabaian perekat dalam memodelkan *glass block*. Penyusunan kepingan-kepingan kaca yang membentuk *sandwich* yang lebih acak dibandingkan model simulasi juga memungkinkan terjadinya penurunan nilai SHGC.

Dari hasil uji VT dan SHGC dapat diperoleh LSG setiap model (Tabel 4). Berdasarkan nilai LSG-nya kedua model dapat dikategorikan sebagai fenestrasi yang efisien energi. Bahkan, LSG sebesar 2,3 dan 4,2 ini lebih besar dibandingkan dengan *energy star glass block* yang baru saja diproduksi oleh Pittsburg Corning (2010).

## KESIMPULAN

*Green glass block* merupakan material baru yang terbuat dari limbah kaca yang dilaminasi di lokasi sehingga mampu meminimalkan kerusakan dan beban lingkungan. Penerapan *sandwich* dan rongga yang didesain dengan pendekatan analitis, simulasi dan uji laboratorium berhasil menciptakan *glass block* berperforma energi tinggi. Dua model yang dinilai paling efisien energi memiliki nilai U (berdasarkan pendekatan analitis), VT dan SHGC (berdasarkan hasil uji laboratorium) yang memenuhi baku fenestrasi untuk daerah tropis lembab. Dengan nilai LSG-nya yang sebesar 2,3 dan 4,2, kedua *glass block* dapat dikelompokkan sebagai fenestrasi yang efisien energi.

Tabel 4. LSG glass block

Model	Hasil Uji Laboratorium			Hasil Kalibrasi		
	VT	SHGC	LSG	VT	SHGC	LSG
110_l2x2_r1_30	0,55	0,19	2,8	0,57	0,25	2,3
118_l3x2_r2_30	0,43	0,08	5,3	0,44	0,10	4,2
Kaca bening 5 mm	0,85	0,65	1,3	0,88	0,83	1,1

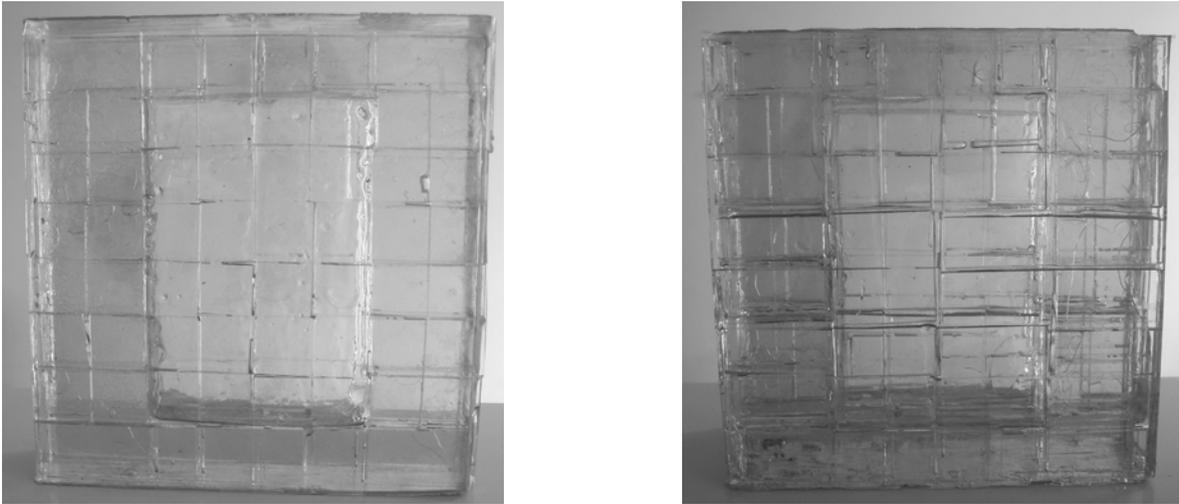
### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada DP2M-Dikti yang telah memberikan dukungan finansial melalui skim penelitian Hibah Bersaing 2009-2010.

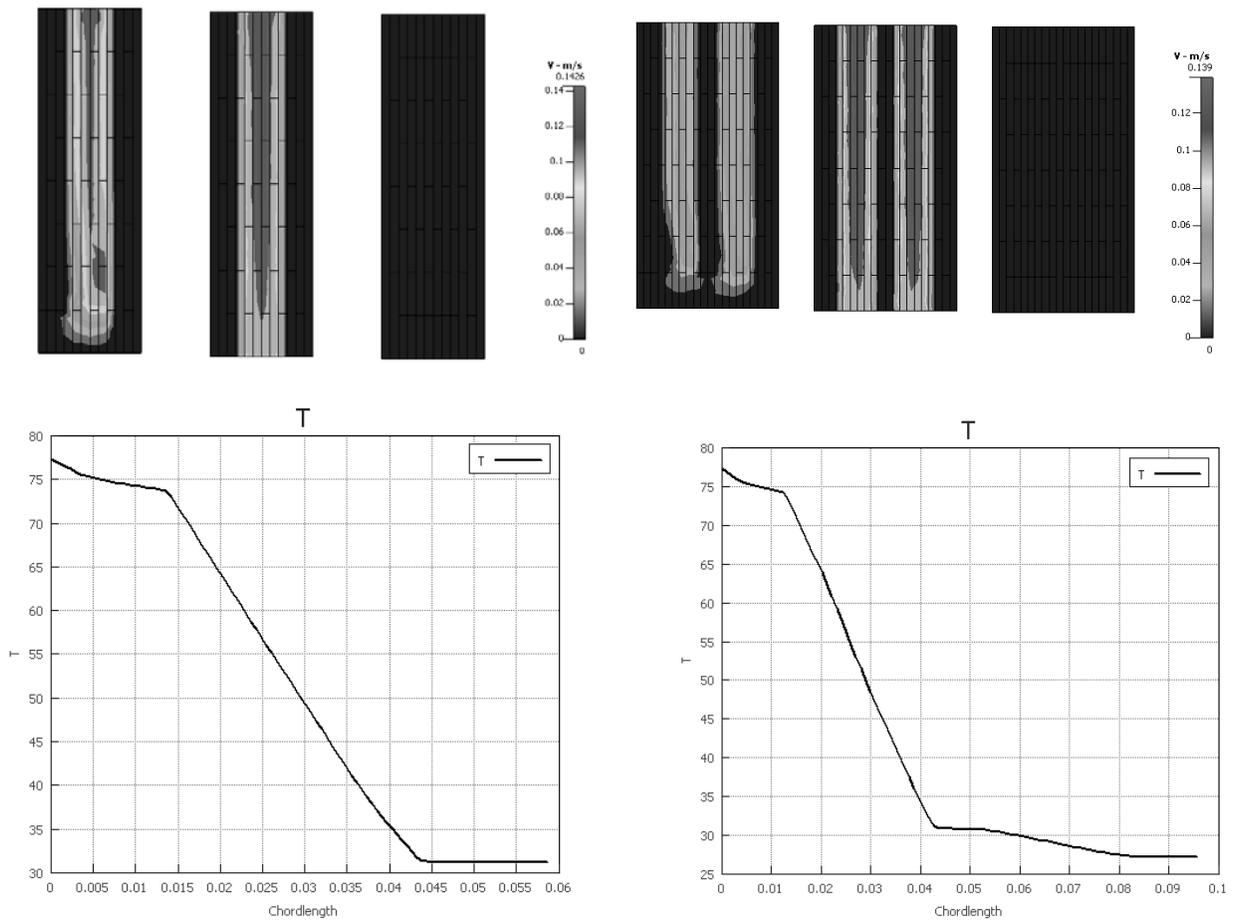
### DAFTAR PUSTAKA

- ASHRAE, 2000, *ASHRAE Handbook: Fundamental*, ASHRAE, Atlanta, hal. 30.13-30.63.
- Binarti, F., AD. Istiadji, P. Satwiko dan PT. Iswanto, 2010, *Pendekatan Analitis dan Simulasi Komputer untuk Mendesain Blok Kaca Rendah Energi dari Limbah Kaca*, Makara Seri Teknologi, *in press*.
- Devia, F., dan M. Misale, G. Tanda, 2000, "Free Convective Heat Transfer in a Partially Open Cavity", *Proc. of CIBSE Conf.*, Dublin.
- Hong X, dan C. Guetari, K.Svihla, 2006, "Simulation of Free Convection with Conjugate Heat Transfer", *Proc. of Int. ANSYS Conf*, Oct. 25-27, Stuttgart.
- International Institute of Energy Conservation and USAID, 2006, *Energy Conservation Building Code 2006*, hal. 8.
- Ng, E., 2001, *Conf. Proc. of the IBPSA Conf.*, Rio de Janeiro, hal. 1215-1222.
- Powles, R, D. Curcija, dan C. Kohler, 2002, "Solar Absorption in Thick and Multilayer Glazings", *Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII June 29-July 5, 2002*, Cologne.
- Reinhart, C.F. dan M. Andersen, 2006, *Journal of Energy and Buildings*, 38/7, 890-904.
- Satwiko, P. dan N. Locke, M. Donn, 1998, *Proc. of the 32<sup>nd</sup> Annual Conf. of the Australia and NZ ASA*, Wellington.
- Solar reflective Glass Block, 2010, [www.pittsburghcorning.com/architects/newproducts\\_srt.asp](http://www.pittsburghcorning.com/architects/newproducts_srt.asp). Diakses pada tanggal 15 Januari 2010.
- Ward, G., F. Rubinstein, R. Clear, 1988, "A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection," *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, August 1988.

**LAMPIRAN**



**Gambar A.** Produk *glass block* 110\_12x2\_r1\_30 (kiri) dan 118\_13x2\_r2\_30 (kanan)



**Gambar B.** Hasil simulasi CFD yang menggambarkan aliran udara di dalam rongga model 110\_12x2\_r1\_30 (atas kiri) dan model 118\_13x2\_r2\_30 (atas kanan) dan gradien suhu pada dua model *glass block* dengan rongga tertutup model 110\_12x2\_r1\_30 (bawah kiri) dan model 118\_13x2\_r2\_30 (bawah kanan)