

PERUBAHAN TEMPERATUR LEMBARAN KACA TERHADAP PERPINDAHAN KALOR TUNAK / STEADY STATE

Eko Julianto¹, Eko Sarwono² dan Mursalin³

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Pontianak
Jl. A. Yani Tromol No.111 Pontianak Kalimantan Barat Telp (0561) 764571

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Pontianak, Kampus Sintang
Jl. Akcaya No. 02 Kecamatan Sintang, Kalimantan Barat
Email: eko.julianto@unmuhpnk.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perpindahan kalor konduksi dan tegangan panas pada permukaan kaca lembaran dengan menggunakan aplikasi komputer secara simulasi finite element analysis. Penelitian ini merujuk kepada ketebalan yang berbeda dari 4-19 mm. Parameter penelitian ini berfokus kepada perpindahan kalor tunak / thermal steady state dan tegangan panas. Metode perpindahan panas yang terjadi secara konduksi, diasumsikan bahwa dengan paparan panas secara steady 200^o - 600^oC dari waktu 20 menit, pada proses simulasi didistribusikan kalor tetap dengan suhu maksimal yaitu 394.2^oC. Hasil riset menunjukkan bahwa terjadi di mana kaca 19 mm dengan kalor maksimal 396.6^oC dan 4 mm minimum 159.9^oC. laju aliran kalor konduksi sebesar 4131 Joule dan minimum kalor 213 Joule. Kaca mengalami tegangan panas yang mengakibatkan kaca float mendapatkan tegangan statik von mises stress (VM) yaitu 16.3 – 176.8 MPa, Titik retak menunjukkan hasil dimana eksperimen sebelumnya sama yaitu pada bagian tepi kaca tersebut.

Kata kunci: Steady State; Konduksi; Laju kalor; Kaca lembaran; Tegangan Panas.

Pendahuluan

Kerusakan kaca pada saat dibakar yang dapat menyebabkan tegangan panas *Thermal stress* / tegangan panas, terjadi ketika gradien termal menyebabkan bagian-bagian kaca berbeda dari suatu objek, pada satu titik waktu stress ini dapat melebihi kekuatan material, yang menyebabkan keretakan terbentuk. Menurut Wang, dkk [1] memprediksi keretakan kaca dan peningkatan di setiap kaca sebanyak 12 tingkat kenaikan suhu yang dirancang dari 150k/s hingga 0.75k/s pada kaca yang dipanaskan. Tekanan termal maksimum terletak pada bagian kaca yang diarsir panas dan dingin, kaca sangat rentan terhadap kegagalan dari *thermal shock* dari kekuatannya yang rendah dan *konduktivitas termal* yang rendah. Jika kaca tiba-tiba terkena panas yang ekstrem atau kejutan maka akan menyebabkan kaca pecah.

Dalam teori pembakaran tekanan termal pada kaca yang disebabkan oleh perubahan suhu antara daerah yang terkena panas dan berbayang adalah faktor kunci berkontribusi terhadap *fraktur* kaca Yu, dkk[2] memprediksikan efek dari kondisi bayangan yang berbeda pada kaca saat terkena panas. Ditemukan tanda yang diarsir adalah cara yang lebih aman melindungi kaca dari retak dan empat sudut kotak yang berbayang kemungkinan memiliki retak yang lebih panjang dan besar. Model tegangan dan *fraktur* permukaan kaca dapat diterapkan untuk diprediksikan kemungkinan terjadinya retakan, variasi distribusi suhu dan waktu tegangan di bawah suhu panas tertentu.

Sebuah model komputasi, berlaku untuk tekanan tinggi, regangan besar, tingkat regangan dan suhu yang tinggi telah dikembangkan oleh Anderson, dkk,[3] menggunakan model kaca komputasi terbaru untuk menilai kemampuannya dalam mereplikasi laju tingkat kerusakan kaca, posisi kegagalan dapat ditentukan sebagai fungsi waktu dalam percobaan menggunakan batang panjang dan pendek sekitar 2100 m/s. Produksi kaca berwarna dengan berbagai teknologi cetakan menjadi lebih penting dalam dunia industri, tujuannya adalah untuk mencapai solusi individu dalam waktu yang sangat singkat. Perlakuan panas konvensional terhadap pembakaran kaca memiliki masalah dominan dengan konsumsi waktu yang tinggi konsumsi energi dan biaya produksi yang rendah ini membutuhkan pengembangan proses alternatif [4].

Variasi indeks bias di atas kaca yang tidak dikeraskan dan kaca yang dikeraskan, lembaran kaca di potong 150.5 cm x 50 cm kotak. Pemodelan statis dari hasil penelitian menunjukkan bahwa kaca yang tidak dikeraskan kaca meningkatkan variabelitas dengan faktor (dengan 95% kemungkinan) dan untuk kaca apung yang keras berkurang variabelitasnya dengan faktor (dengan probabilitas 95%) [5]. Kaca adalah bahan organik non logam yang disiapkan oleh kristalisasi terkontrol dari kaca melalui metode pemrosesan, kaca setidaknya mengandung satu jenis fase kristal

fungsional dan mengandung residu kaca. Fraksi volume yang kristalisasinya dapat bervariasi dari ppm hingga hampir 100% [6].

Peningkatan ketebalan antar lapisan dari 0.38 mm menjadi 0.76 mm meningkatkan delaminasi secara signifikan, sedangkan peningkatan lebih lanjut dalam ketebalan antara lapisan ke nilai yang lebih tinggi memiliki efek yang lebih rendah [7].

Sementara mengenai kalor konduksi pada kaca lembaran dengan variasi ketebalan masih terbatas dan juga ukuran dimensi kaca dan suhu yang dilakukan peneliti sebelumnya menggunakan Standard (GB11614) yaitu menggunakan kaca lembaran dengan ukuran 4 – 19 mm dan panas mencapai 200-600°C [8].

Metodologi Penelitian

Proses analisis dijalankan menggunakan software *Mecway 10* yang dapat menghasilkan *output* sesuai jenis analisa yang dilakukan pada simulasi. Setelah *output* diketahui, kemudian dapat dibandingkan bagaimana hasil dari variasi ketebalan kaca dan melakukan pengujian variasi temperatur proses pengujian kaca untuk mengetahui batas maksimal suhu paparan kalor sampai kaca mengalami *thermal crack*, dengan analisis *thermal stress*, dari waktu ideal dan panas yang telah ditentukan.

1. Perpindahan Kalor Tunak

Perpindahan kalor tunak atau *thermal steady state* adalah untuk menentukan suhu *gradien termal*, laju aliran panas, dan *flux* panas dalam objek yang disebabkan oleh beban termal yang tidak berubah dari waktu ke waktu. Analisis *kalor tunak* menghitung efek dari beban termal yang stabil dalam suatu sistem atau komponen. Analisis *thermal steady state* [9].

Menurut penelitian *Zhang, dkk*[8], disebutkan bahwa setelah pemaparan panas radiasi sampai ke suhu puncak atau maksimal dari waktu 1 menit dan ditahan pada 20 menit sampai kaca dinyatakan tidak mengalami deformasi akibat tegangan panas.

Adanya suatu gradien temperatur di dalam kaca akan menyebabkan laju perpindahan kalor dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Di mana :

Q = Laju perpindahan kalor (J/s)

k = Konduktivitas termal bahan (W/mK)

A = Luas penampang bahan (m²)

ΔT = Perbedaan suhu ujung-ujung logam (K)

Δx = Panjang atau tebal bahan (m)

Di mana *konduktivitas termal k* adalah konstanta eksperimental dan $\Delta T / \Delta x$ adalah gradien temperatur ke arah normal terhadap luas A .

2. Thermal Stress

Thermal stress adalah stress yang diciptakan dari perubahan suhu dari material, tegangan ini dapat menyebabkan fraktur atau deformasi plastis tergantung pada variable lain dari pemanasan yang meliputi jenis dan kendala material. Peningkatan kalor ini akan menyebabkan panas ekspansi, yang tidak rata dengan ekspansi kaca yang menghasilkan tekanan di dalam rangka [10].

Persamaan yang digunakan untuk menghitung besarnya *thermal stress* yang terjadi pada material dapat mengikuti formula berikut:

$$SC = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Di mana P adalah tekanan panas yang keluar dan A terhadap luas permukaan kaca.

Di mana :

SC = Thermal stress (MPa)

P = Tekanan panas (N)

A = Luasan (m²)

Sedangkan persamaan yang mengatur besarnya nilai tekanan pada panas terhadap material menggunakan formulasi berikut:

$$P = \delta \cdot A \cdot E \cdot \Delta T \quad (3)$$

Di mana :

δ = Koefisien panas (/°C)

E = Young modulus (MPa)

ΔT = Selisih suhu (°C)

Tekanan P , adalah δ koefisien ekspansi termal terhadap A luas. E young modulus di mana ΔT adalah perbedaan suhu.

Untuk parameter penting dalam penelitian ini, setelah tegangan normal distribusi tegangan panas diperoleh, tegangan utama dapat dihitung dengan *stress* setara atau *von mises stress* pada kaca yang digunakan formula berikut:

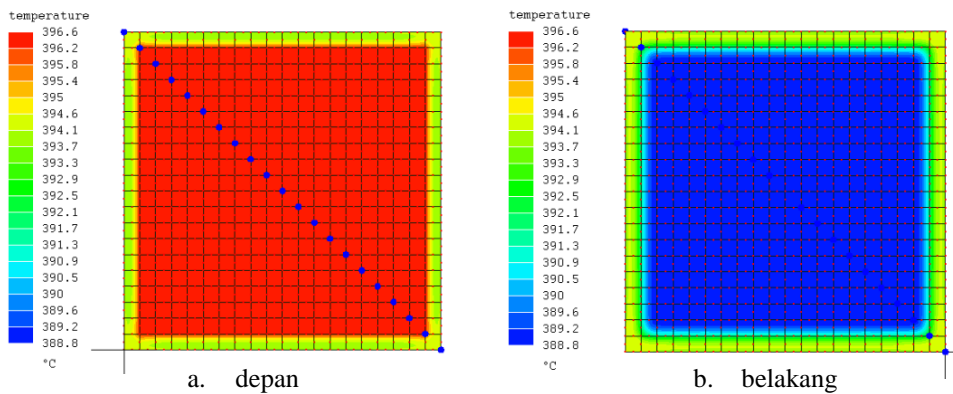
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(O_1 - O_2)^2 + (O_2 - O_3)^2 + (O_3 - O_1)^2]} \tag{4}$$

Di mana O_1, O_2 dan O_3 *prinsipal stress* adalah tegangan yang bekerja tegak lurus bidang utama atau *surface*.

3. Standarisasi kaca

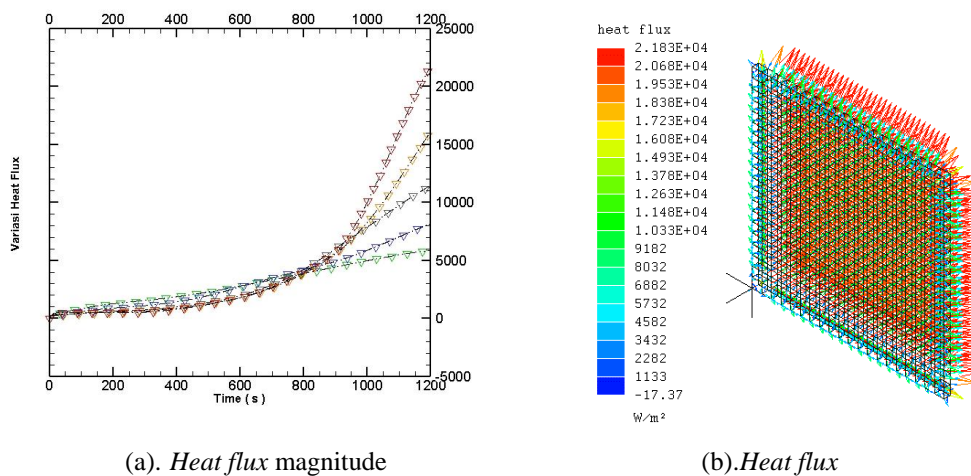
Di Indonesia saat ini terdapat dua jenis standar kaca lebaran yaitu SNI 15-0047-2005 mutu dan cara uji kaca lembaran yang di produksi dengan proses penarikan dan SNI 15-0130-1999 kaca pengembangan, yang di produksi dengan proses pengembangan leburan logam. Ditinjau dari bentuknya kedua jenis kaca ini licin, halus dan rata, namun produk kaca yang lebih besar memiliki cacat gelombang yang lebih besar. Demikian juga kedua standar kaca mempunyai hasil uji yang juga sama, yaitu sifat : tampak, bentuk, dimensi, kesikuan dan kerataan. Agar tidak terjadi kerancuan istilah kaca lebaran dimasyarakat Indonesia dan internasional maka kedua standar tersebut direvisi menjadi kaca lembaran / *flat glass* (*badan standarisasi nasional. 2005*) / BSN [11].

Hasil dan Pembahasan



Gambar 1. Analisis temperatur pada kaca

Dari Gambar 1 suhu pada puncak temperatur kaca 19mm di simulasi menunjukkan 396.6°C berada di tengah kaca dengan gradasi warna merah, sedangkan sisi tepi kaca di dalam rangka menunjukkan temperatur 394.2°C, itu menunjukkan panas pada kaca tepi terisolasi dengan baik karna suhu yang tetap dan sama dengan pusat panas pada tengah kaca, sedangkan pada sisi b; temperatur pada bagian belakang kaca pada sekitar 388.8°C. untuk kaca dengan ketebalan 4 sampai 12 mm berkisar 159.8; 230; 291.9; 357.6 dan 388.8°C.



(a). Heat flux magnitude

(b).Heat flux

Gambar 2. Variasi pada ketebalan dan waktu

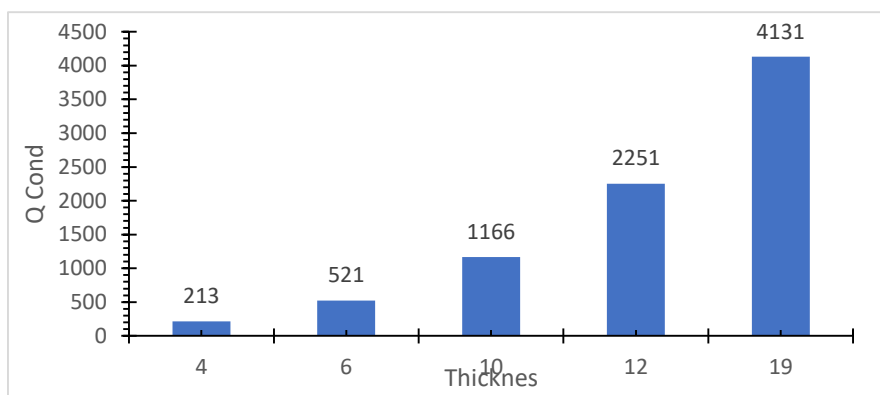
Dapat dijelaskan pada Gambar 2 terdapat grafik dan gambar hasil perpindahan panas pada kaca yang keluar ke suhu sekitar atau ambiens, peningkatan *heat flux magnitude* dari ketebalan yang paling tipis yaitu 4 mm sampai ke

yang paling tebal 19 mm, dan terlihat garis merah menjalar keluar itu bisa diartikan bahwa ada panas yang keluar diakibatkan aliran panas dalam yang besar menjalar keluar kaca bagian luar atau ke belakang, untuk lebih jelasnya lihat tabel 1 di bawah ini dengan melihat urutan waktu pemanasan awal dari uji *thermal steady state* sampai waktu maksimal atau puncak dari simulasi panas radiasi.

Tabel 1. Variasi Dimensi Kaca Dengan *Thermal Steady State*

Time (min)	Thickness (mm)	Steady (°C)	Heat flux (w/m ²)
20	4	160	5892
20	6	231.2	8210
20	10	294.2	11489
20	12	361	16185
20	19	394.2	21778

1. Perubahan Laju Aliran kalor



Gambar 3. Q Cond

Laju perpindahan kalor secara konduksi Q cond , kaca 4mm 213 joule, 6mm 521 joule, 10mm 1166 joule, 12mm 2251 joule dan 19mm 4131 joule. Bisa di asumsikan bahwa perpindahan kalor radiasi dan konduksi masuk dan keluar terhadap kaca float dengan ketebalan 4 – 19 mm per menit mengalami perubahan suhu yang sangat besar di karena kan laju aliran panas menyerap kaca sangat baik sehingga dalam waktu 20 menit kaca sudah mulai pecah atau retak maka disebutlah *thermal crack*.

2. Von Mises Stress Solid

Perhitungan yang didapat dari proses simulasi *Thermal stress*, terlihat pada 4 mm $\Delta T = 2.6$ °C, untuk nilai (P) = 0.5948 newton / N dan (Sc) = 1.6522 MPa , untuk 6 mm $\Delta T = 10.9$ °C, nilai (P) = 2.493 newton / N dan (Sc) = 6.9266 MPa, hasil dengan ketebalan 10 mm $\Delta T = 41.6$ °C, nilai pada (P) = 9.5168 newton / N dan (Sc) = 26.43 MPa, selanjutnya 12 mm $\Delta T = 94.6$ °C, nilai (P) = 21.641 newton / N dan (Sc) = 60.11 MPa, hasil penelitian 19 mm sangat jauh berbeda karna ketebalan yang sangat signifikan dari 4 – 12 mm yaitu $\Delta T = 276.1$ °C, untuk nilai (P) = 63.163 newton / N dan hasil akhir pada tegangan panasnya (Sc) = 175.4 MPa.

Tabel 2. Tegangan panas

Thickness (mm)	Sc (MPa)	Sc Steady (MPa)
4	1.65	16.3
6	6.92	43.11
10	26.44	80.47
12	60.11	115.7
19	175.4	176.8

Kesimpulan

Hasil simulasi dan analisis dapat membantu kita untuk menentukan kasus mana yang relatif lebih aman dan memberikan masukan secara teknik untuk perlakuan panas kaca float. Hasilnya juga dapat berfungsi sebagai data verifikasi untuk peneliti lain melakukan penelitian serupa di masa depan seperti eksperimen perlakuan panas

menggunakan kaca *berstandar nasional indonesia SNI*, hampir tidak ada data atau contoh eksperimen keseluruhan yang digunakan diindonesia terutama yang berstandar *SNI* seperti itu dalam literatur, untuk aplikasi *thermal stress* dan *steady state* juga dapat disimulasikan hanya dengan mengganti sifat *termal* jenis kaca atau kondisi yang terpapar panas radiasi. Dilakukan simulasi untuk mengurangi kesalahan pada penelitian selanjutnya dan juga menjadi acuan terbaru dari kaca lembaran Indonesia itu sendiri, simulasi ini dapat menghasilkan banyak desain kaca yang digunakan untuk memverifikasi apakah kaca *float* cukup untuk aplikasi software tertentu dan khususnya dibidang simulasi panas pada kaca.

Daftar Pustaka

- [1] Q. Wang, H. Chen, Y. Wang, and J. Sun, "Thermal shock effect on the glass thermal stress response and crack propagation," *Procedia Engineering.*, vol. 62, pp. 717–724, 2013.
- [2] Y. Wang, Q. Wang, X. Fan, and J. Sun, "Simulating the thermal response of glass under various shading conditions in a fire," *Procedia Engineering.*, vol. 62, no. 1, pp. 702–709, 2013.
- [3] C. E. Anderson and T. J. Holmquist, "Computational Modeling of Failure for Hypervelocity Impacts into Glass Targets," *Procedia Engineering.*, vol. 58, pp. 194–203, 2013.
- [4] P. Stief, J. Dantan, A. Etienne, and A. Siadat, "ScienceDirect ScienceDirect New process of tempering color printed glass by using laser irradiation A new methodology to analyze the functional and physical architecture of for an assembly oriented product family identification," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 390–393, 2018.
- [5] K. P. Rushton, S. A. Coulson, A. W. N. Newton, and J. M. Curran, "The effect of annealing on the variation of glass refractive index," *Forensic Science International.*, vol. 209, no. 1–3, pp. 102–107, 2011.
- [6] J. Deubener *et al.*, "Updated definition of glass-ceramics," *Journal of Non Crystalline Solids*, no. January, pp. 1–8, 2018.
- [7] A. Vedrtnam, "Experimental and simulation studies on delamination strength of laminated glass composites having polyvinyl butyral and ethyl vinyl acetate inter-layers of different critical thicknesses," *Defence. Technology.*, pp. 1–5, 2018.
- [8] Y. Zhang, Q. S. Wang, X. Bin Zhu, X. J. Huang, and J. H. Sun, "Experimental study on crack of float glass with different thicknesses exposed to radiant heating," *Procedia Engineering.*, vol. 11, pp. 710–718, 2011.
- [9] W. Adi Siswanto, "Instructors Manual Finite Element Method Laboratory Sessions," no. July, p. 200, 2010.
- [10] H. Chowdhury and M. B. Cortie, "Thermal stresses and cracking in absorptive solar glazing," *Construction and Building Material.*, vol. 21, no. 2, pp. 464–468, 2007.
- [11] Standar Nasional Indonesia and Badan Standar Nasional, "*Float glass*," SNI 15-0047-2005.; SNI 15-0130-1999 , 2005.