

# PENGARUH KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PANEL KACA

Fridha Nurrahma, Muryanti  
Ilham Nurhuda <sup>\*</sup>), Han Ay Lie

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang, Semarang 50239,  
Telp.: (024) 7474770, Fax.: (024) 7460060

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan kaca terhadap kekuatan kaca *annealed*. Penelitian ini dilakukan menggunakan pengujian laboratorium dan simulasi numerik. Pengujian laboratorium dilakukan menggunakan metode cincin ganda, sedangkan simulasi numerik dilakukan dengan *Finite Element Method (FEM)*. Simulasi numerik dilakukan untuk menentukan *meshing* yang efisien, dimensi benda uji, dan kapasitas alat. Jumlah benda uji sebanyak 400 dengan ukuran 200 mm x 200 mm. Ketebalan benda uji bervariasi mulai dari 3 mm sampai 10 mm.

Hasil pengujian berupa beban maksimum dan asal retak. Kedua hasil tersebut digunakan untuk menghitung kekuatan kaca yang dinyatakan sebagai tegangan hancur pada lokasi asal retak. Tegangan hancur yang didapatkan tersebar dalam rentang yang luas, sehingga diperlukan metode statistik untuk menganalisis kekuatan kaca. Dari analisis tersebut dapat diketahui bahwa kekuatan kaca dipengaruhi oleh ketebalannya. Beberapa grafik dibuat untuk menunjukkan beban ijin yang mampu ditahan oleh panel kaca dengan dimensi tertentu.

**Kata kunci :** kaca *annealed*, ketebalan kaca, tegangan hancur, kekuatan kaca

## ABSTRACT

*This research aimed at investigating the effect of glass thickness on the strength of annealed glass panels. The research was conducted using both experimental tests and numerical simulations. The experimental tests were conducted using the double ring method, while the numerical simulations were carried out using Finite Element Method (FEM). Numerical simulations were conducted first to determine efficient meshing, dimension of the specimen, and the equipment capacity. The number of specimens were 400 with the same width and length of 200 mm x 200 mm. The thickness of which were varied from 3 mm up to 10 mm.*

*The test results were maximum load and fracture origin. Both of these results were used to calculate the strength of the glass that was expressed as failure stress at the location of fracture origin. The failure stress scattered in a wide range, hence statistical analysis was required to analyze the glass strength. From the analysis, it can be seen that the strength of glass was affected by its thickness. Some graphs have been created to show the allowable pressure that can be resisted by certain dimension of glass panels.*

**Keywords :** annealed glass, glass thickness, failure stress, glass strength

---

<sup>\*</sup>) Penulis korespondensi, Email: ilham@undip.ac.id

## **PENDAHULUAN**

### **Latar Belakang**

Perkembangan bangunan bertingkat tinggi (*high rise building*) tumbuh dinamis dengan berbagai macam transformasi teknologi dalam penggunaan material. Di berbagai perkotaan besar banyak dijumpai bangunan pencakar langit (simbol modernitas suatu kota) yang didominasi penggunaan panel kaca sebagai pengganti dinding konvensional (material *portland cement*). Meskipun umumnya kaca digunakan sebagai elemen non-struktural, saat ini kaca telah pula digunakan sebagai elemen struktural pada beberapa bangunan di dunia (Laufs, 2003). Sehingga material kaca menjadi material konstruksi yang sangat penting.

Saat ini Indonesia belum memiliki peraturan perencanaan dan penggunaan kaca pada bangunan, sehingga masih mengacu pada peraturan di luar negeri seperti Amerika (ASTM-E1300, 2007), Australia (AS1288, 2006), atau Eropa (Eurocode-EN-572-1-2004). Praktek menggunakan peraturan perencanaan dari luar negeri tentunya tidak sepenuhnya tepat karena kondisi di negara tempat peraturan itu dibuat tentu berbeda dengan kondisi di Indonesia, baik dari material kacanya, intensitas dan magnitude beban-beban yang bekerja, serta budaya manusianya.

Untuk dapat merencanakan panel kaca secara baik dan ekonomis maka salah satu hal penting yang harus diketahui adalah kekuatan dari kaca, yaitu batas tegangan yang menyebabkan hancurnya kaca (*failure stress*). Oleh karena itu, dilakukan penelitian mengenai pengaruh ketebalan terhadap kekuatan panel kaca.

### **Maksud dan Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh ketebalan panel kaca terhadap kekuatannya, memformulasikan kekuatan kaca yang dapat digunakan dalam perhitungan praktis serta membuat alat bantu perencanaan berupa grafik hubungan antara dimensi kaca dan beban yang mampu dipikul.

Penelitian ini merupakan langkah awal untuk mewujudkan peraturan perencanaan kaca pada bangunan di Indonesia. Dengan mengetahui perilaku dan kekuatan kaca yang biasa dipakai pada bangunan di Indonesia, maka diharapkan penggunaan kaca pada bangunan dapat lebih baik, handal, dan ekonomis.

### **Batasan Penelitian**

Batasan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Penelitian menggunakan benda uji kaca tipe *annealed*.
2. Metode pengujian yang dilakukan dengan menggunakan metode cincin ganda.

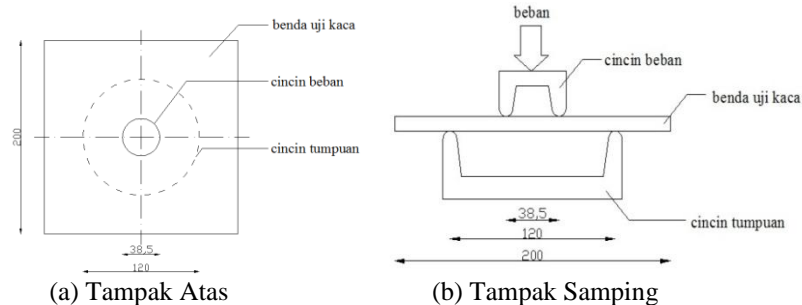
## **METODOLOGI PENELITIAN**

Adapun metodologi dalam penelitian ini, antara lain:

1. Simulasi numerik untuk menentukan jarak *meshing* yang efisien, dimensi benda uji dan alat uji dengan menggunakan *software ANSYS* (2006) versi *education*.

---

\*<sup>1</sup>) Penulis korespondensi, Email: [ilham@undip.ac.id](mailto:ilham@undip.ac.id)



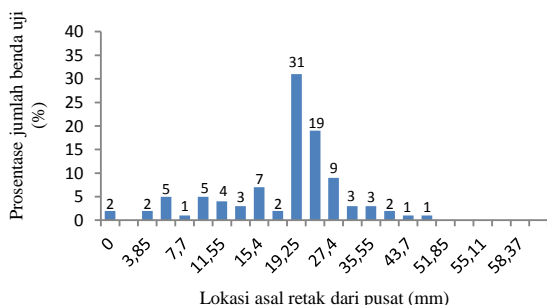
**Gambar 1.** Model Pengujian dengan Metode Cincin Ganda

2. Pengujian di laboratorium untuk mendapatkan beban dan lokasi asal retak. Jumlah total benda uji kaca sebanyak 400 dengan ukuran 200 mm x 200 mm dan ketebalan yang berbeda-beda dari 3 mm, 5 mm, 8 mm, dan 10 mm.
3. Perhitungan kekuatan kaca menggunakan persamaan tegangan dan pemodelan benda uji pada *software* ANSYS (2006) versi *education*.
4. Analisis statistik kekuatan kaca menggunakan tiga distribusi statistik yaitu distribusi Normal, Log-Normal dan *Weibull*.
5. Analisis kekuatan kaca pada level kemungkinan kegagalan 5/1000.
6. Pembuatan alat bantu perencanaan berupa grafik hubungan antara dimensi kaca dan besarnya beban yang mampu dipikul.

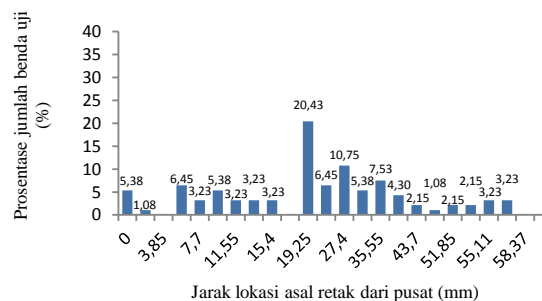
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Hasil Pengujian

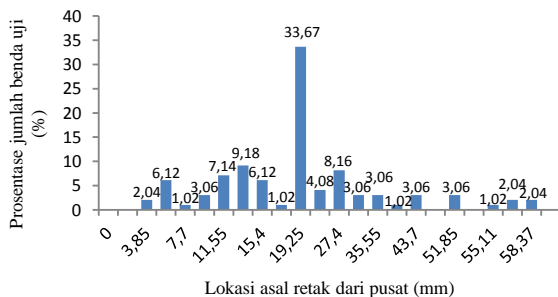
#### 1. Jarak lokasi asal retak (*r*)



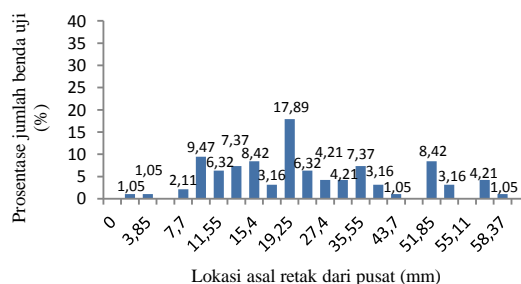
(a). kaca 3 mm



(b). kaca 5 mm



(a). kaca 8 mm



(b). kaca 10 mm

**Gambar 2.** Penyebaran Lokasi Asal Retak

## 2. Beban

**Tabel 1.** Data Beban Hasil Pengujian Kaca

Kaca 3 mm

No	Interval Beban (N)	Frekuensi
1	0 – 500	1
2	501 – 1000	30
3	1001-1500	39
4	1501 – 2000	14
5	2001 – 2500	7
6	2501 – 3000	7
7	3001 – 3500	2
Total		<b>100</b>

Kaca 5 mm

No	Interval Beban (N)	Frekuensi
1	0 - 1000	0
2	1001 - 2000	1
3	2001 - 3000	16
4	3001 - 4000	21
5	4001 - 5000	29
6	5001 - 6000	12
7	6001 - 7000	11
8	7001 - 8000	3
Total		<b>93</b>

Kaca 8 mm

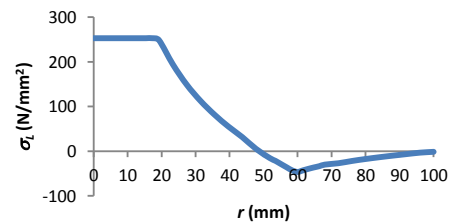
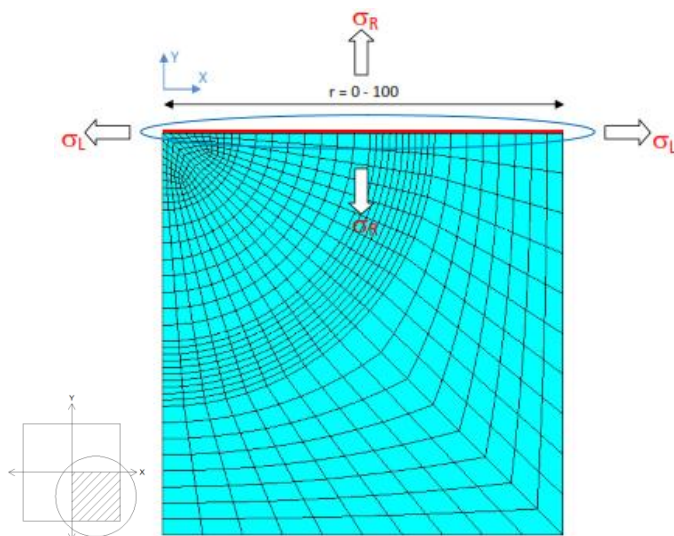
No	Interval Beban (N)	Frekuensi
1	0 – 2000	0
2	2001 - 4000	3
3	4001 - 6000	15
4	6001 - 8000	25
5	8001 - 10000	22
6	10001 - 12000	22
7	12001 - 14000	7
8	14001 - 16000	4
Total		<b>98</b>

Kaca 10 mm

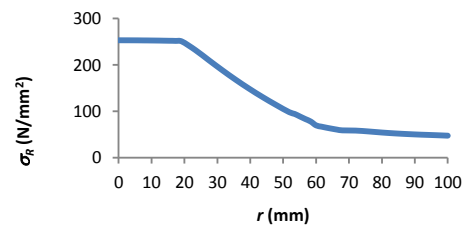
No	Interval Beban (N)	Frekuensi
1	0 – 3000	0
2	3001 – 6000	0
3	6001 - 9000	14
4	9001 - 12000	20
5	12001 - 15000	27
6	15001 - 18000	18
7	18001 - 21000	13
8	21001 - 24000	3
Total		<b>95</b>

### Perhitungan Kekuatan Kaca

Kekuatan kaca dinyatakan sebagai tegangan maksimum pada lokasi asal retak. Tegangan itulah yang disebut sebagai tegangan hancur kaca. Dalam hal ini, tegangan hancur kaca dihitung menggunakan pemodelan benda uji pada *software* ANSYS (2006) versi *education* dengan memasukkan nilai Modulus Elastisitas ( $E$ ) sebesar  $69000 \text{ N/mm}^2$  dan angka poisson ( $\mu$ ) sebesar 0.23 (Oh dkk, 2002).



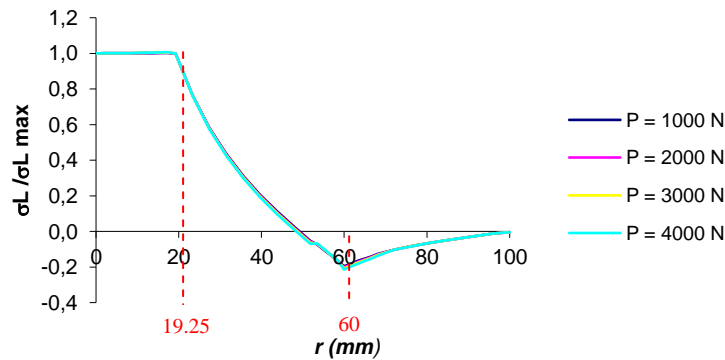
(a) Grafik Hubungan antara  $r$  dan Tegangan Arah Longitudinal



(b) Grafik Hubungan antara  $r$  dan Tegangan Arah Radial

**Gambar 3.** Diagram Tegangan pada Panel Kaca Ketebalan 10 mm saat beban ( $P$ ) = 34000 N

Bentuk diagram akan sama apabila dipakai nilai normalisasi. Oleh karena itu, untuk memudahkan dalam penentuan tegangan benda uji dengan jumlah yang banyak, dibuat persamaan tegangan. Penentuan persamaan dibuat sedemikian rupa sehingga persamaan tegangan ( $\sigma$ ) merupakan fungsi dari beban ( $P$ ) dan ketebalan ( $t$ ). Sebagai contoh penentuan persamaan tegangan, perhitungan menggunakan kaca dengan ketebalan 5 mm yang dibebani 1000 N, 2000 N, 3000 N, dan 4000 N.



**Gambar 4.** Grafik Hubungan antara  $r$  dan Rasio Tegangan Arah Longitudinal

- Persamaan tegangan maksimum ( $r = 0 - 19.25$  mm pada Gambar 4)

$$\text{Tegangan arah longitudinal} : \sigma_L \max = \frac{0.716 P}{t^2}$$

$$\text{Tegangan arah radial} : \sigma_R \max = \frac{0.718 P}{t^2}$$

syarat : untuk  $t = 3$  mm ,  $P \leq 4000$  N  
 $t = 5$  mm ,  $P \leq 10000$  N  
 $t = 8$  mm ,  $P \leq 30000$  N  
 $t = 10$  mm ,  $P \leq 40000$  N

- Persamaan tegangan ( $r = 23.325 - 60$  mm pada Gambar 4)

Tegangan arah longitudinal :

$$\sigma_L = \left( \frac{0.716 P}{t^2} \right) \left( -0.85 \frac{(r - R1)^3}{(R2 - R1)} + 2.06 \frac{(r - R1)^2}{(R2 - R1)} - 2.4 \frac{(r - R1)}{(R2 - R1)} + 1 \right)$$

Tegangan arah radial :

$$\sigma_R = \left( \frac{0.718 P}{t^2} \right) \left( 0.108 \frac{(r - R1)^3}{(R2 - R1)} + 0.006 \frac{(r - R1)^2}{(R2 - R1)} - 0.825 \frac{(r - R1)}{(R2 - R1)} + 1.003 \right)$$

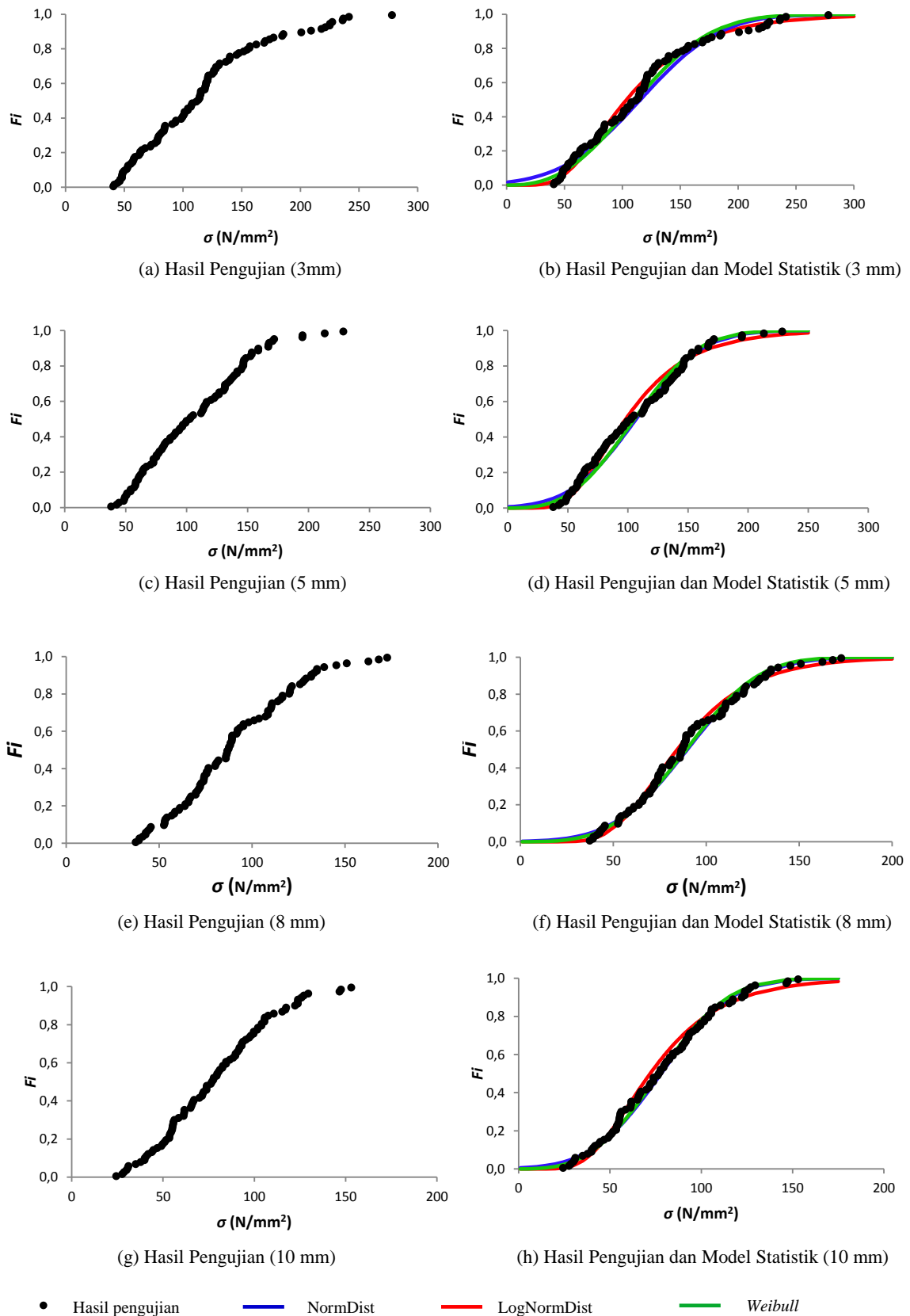
Dimana :  $P$  = beban (N)  
 $t$  = ketebalan kaca (mm)  
 $r$  = jarak lokasi retak dari pusat benda uji  
 $R1$  = Jari-jari lingkaran beban = 19.25 mm  
 $R2$  = Jari-jari lingkaran tumpuan = 60 mm

## Analisis Statistik Kekuatan Kaca

Distribusi kumulatif ( $F_i$ ) atau biasa disebut dengan kemungkinan kegagalan (*probability of failure*) dari data hasil pengujian dapat dihasilkan dengan menerapkan persamaan 1.

$$F_i = \frac{i-0,5}{N} \quad (1)$$

dimana  $F_i$  adalah kemungkinan kegagalan,  $N$  adalah jumlah data, dan  $i$  adalah peringkat tegangan hancur kaca setelah diurutkan dari kecil ke besar jadi  $i = 1$  untuk yang paling lemah dan  $i = N$  untuk tegangan yang paling kuat.



**Gambar 5.** Grafik Distribusi Tegangan Hancur Kaca

Tegangan hancur kaca dari hasil analisis distribusi statistik dibandingkan dengan tegangan hancur kaca sebenarnya yang dihasilkan dari hasil pengujian. Kecocokan dari hasil analisis distribusi statistik dan data hasil pengujian dapat diukur menggunakan koefisien determinasi ( $r^2$ ) yang ditunjukkan pada persamaan 2.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma - x)^2}{\sum_{i=1}^N (\sigma - \bar{\sigma})^2} \quad (2)$$

dimana  $r^2$  adalah koefisien determinasi,  $N$  adalah jumlah data,  $\sigma$  adalah tegangan hancur kaca,  $x$  adalah tegangan dari hasil perhitungan model statistik, dan  $\bar{\sigma}$  adalah nilai rata-rata dari tegangan hancur kaca.

**Tabel 2.** Nilai  $r^2$  dari Ketiga Distribusi Statistik yang Diperiksa

Tebal (mm)	$r^2$		
	Normal	Log-Normal	Weibull
3	0.934	<b>0.961</b>	0.956
5	0.963	0.947	<b>0.975</b>
8	0.975	0.968	<b>0.980</b>
10	0.982	0.936	<b>0.990</b>

Distribusi *Weibull* memberikan  $r^2$  yang lebih baik akan tetapi pada level kemungkinan rendah, tegangan hancur yang dihasilkan oleh distribusi ini jauh lebih rendah dari tegangan hancur kaca hasil pengujian. Oleh karena itu, distribusi statistik yang paling cocok digunakan untuk memodelkan distribusi kekuatan kaca adalah distribusi Log-Normal karena distribusi ini memberikan tegangan hancur kaca yang lebih sesuai dengan tegangan hancur kaca dari hasil pengujian untuk level kemungkinan kegagalan yang rendah, meskipun nilai  $r^2$  pada distribusi ini paling besar hanya pada ketebalan 3 mm.

### Analisis Kekuatan Kaca

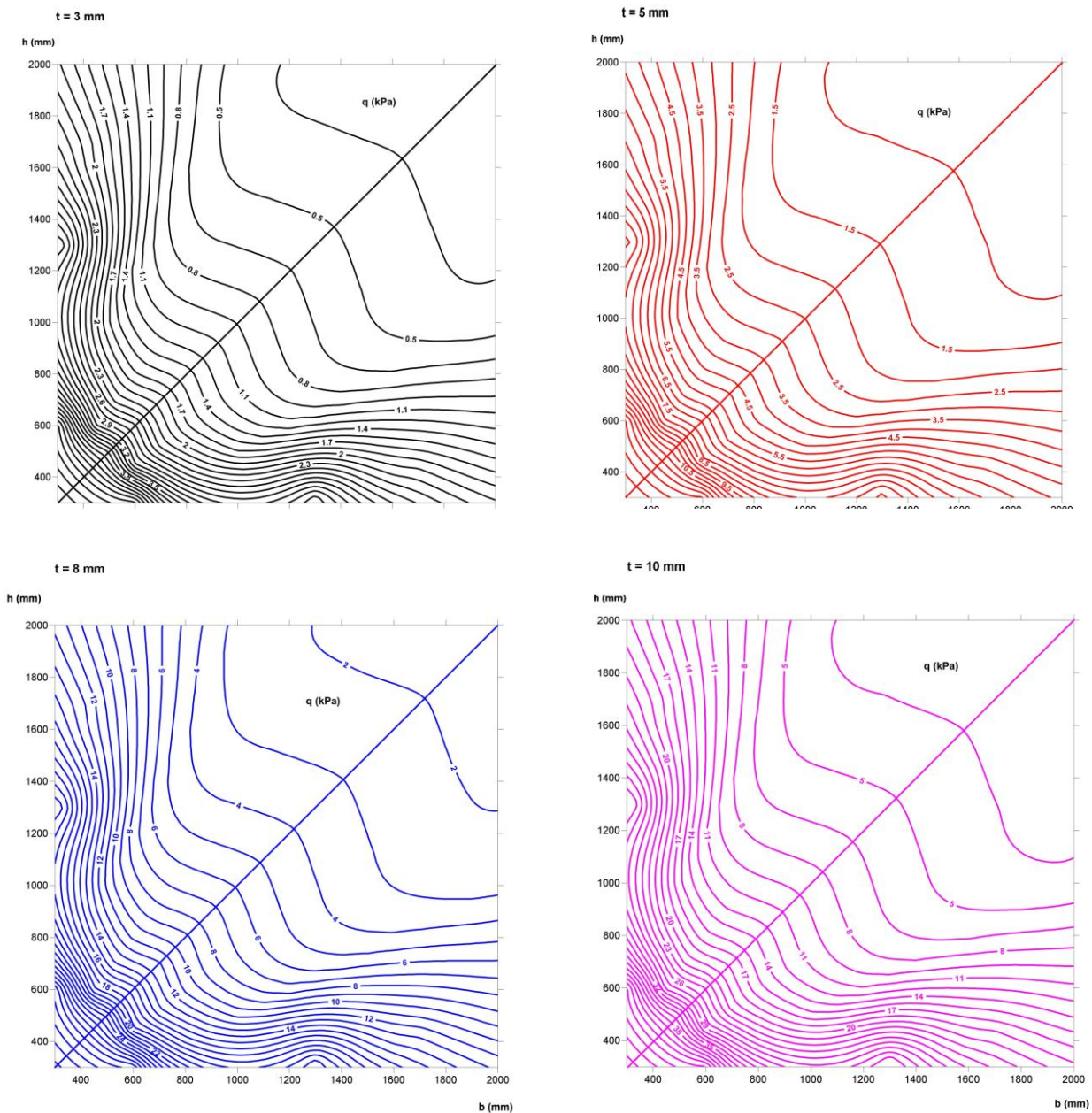
Dengan distribusi Log-Normal dapat dihitung kekuatan kaca pada level kemungkinan kegagalan 5/1000. *Trendline* yang menunjukkan pengaruh ketebalan kaca terhadap kekuatannya menghasilkan persamaan untuk menentukan tegangan hancur kaca seperti pada persamaan (3).

$$\sigma_f = -0.661 t + 30.61 \quad (3)$$

Dimana:  $\sigma_f$  = Tegangan hancur kaca (N/mm<sup>2</sup>)  
 $t$  = Ketebalan kaca (mm) ( $3 \leq t \leq 10$ )

### Alat Bantu Perencanaan Kaca

Tegangan hancur kaca yang didapatkan pada perhitungan analisis kekuatan kaca selanjutnya digunakan untuk membuat grafik hubungan antara dimensi kaca dan beban maksimum ( $q$ ) yang mampu dipikul oleh kaca untuk dimensi tertentu.



**Gambar 6.** Grafik Hubungan antar Dimensi Kaca dan Beban

Keterangan :  $b$  = lebar kaca (mm)  
 $h$  = tinggi kaca (mm)  
 $q$  = beban maksimum yang mampu dipikul oleh kaca untuk dimensi tertentu (kPa)

## KESIMPULAN

1. Dari hasil pengujian, dapat diketahui bahwa semakin tebal panel kaca, maka beban yang mampu dipikul semakin besar. Namun, dari hasil analisis diketahui bahwa tegangan hancur kaca akan semakin rendah seiring dengan bertambahnya ketebalan.



Simpulannya ini diperoleh dari hasil analisa tegangan hancur rata-rata pada penelitian ini yang menunjukkan bahwa kaca yang tebalnya 3 mm memiliki tegangan hancur yang paling besar dan tegangan hancur itu semakin berkurang seiring dengan bertambahnya ketebalan kaca.

2. Tegangan hancur kaca yang didapatkan pada penelitian ini tersebar dalam rentang distribusi yang luas. Oleh karena itu dilakukan metode statistik untuk menganalisis kekuatan kaca. Pada penelitian ini, distribusi statistik yang paling sesuai digunakan untuk memodelkan distribusi kekuatan kaca adalah distribusi Log-Normal dimana kekuatan kaca pada level kemungkinan kegagalan 5/1000 pada distribusi ini ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_f = -0.661 t + 30.61$$

Dimana:  $\sigma_f$  = Tegangan hancur kaca (N/mm<sup>2</sup>)  
 $t$  = Ketebalan kaca (mm)

Hasil tersebut di atas dapat dipertahankan untuk ketebalan kaca mulai dari 3 mm sampai dengan 10 mm ( $3 \text{ mm} \leq t \leq 10 \text{ mm}$ ).

3. Kekuatan kaca tiap ketebalan yang dirumuskan pada kesimpulan nomor 2 telah digunakan untuk membuat grafik hubungan antara dimensi kaca dan beban ( $q$ ) yang mampu dipikul kaca untuk dimensi tertentu. Grafik ini bertujuan untuk mempermudah perencana dalam menentukan ketebalan kaca ( $t$ ) yang dipakai apabila sudah diketahui dimensi kaca dan besarnya  $q$  yang akan dipikul oleh kaca tersebut.
4. Dari hasil simulasi yang dilakukan menggunakan *software* ANSYS, dapat diketahui bahwa tegangan maksimum terjadi di titik pusat benda uji. Akan tetapi, hasil pengujian menunjukkan bahwa lokasi asal retak tidak selalu terjadi di pusat benda uji.

## DAFTAR PUSTAKA

- AS1288. 2006. *Glass in Building-Selection and Installation*. Sydney: Standard Australia.
- ASTM-E1300. 2007. *Standard practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*. West Conshohocken: ASTM International.
- Beason, W. L. 1998. *Basic for ASTM E1300 Annealed Glass Thickness Selection Charts*. Journal of Structural Engineering. ASCE, 124(2), 215-221.
- Beason, W. L., & Morgan, J. R. 1984. *Glass Failure Prediction Model*. Journal of Structural Engineering. ASCE, 110(2), 197-212.
- Calderone, I., & Jacob, L. 2001. *The Fallacy of The Weibull Distribution for Window Glass Design*. Paper presented at The Glass Processing Days.
- EN-572-1. 2004. *Glass in Building - Basic Soda-lime Silicate Glass Products -Part 1*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN-1748-1-1. 2004. *Glass in Building - Special Basic Products - Borosilicate Glasses Products - Part 1-1*. Brussels: European Committee for Standardization.
- G James Group. 2000. *G.James is Glass Handbook*. From [www.gjames.com.au](http://www.gjames.com.au).
- Haldiman, M. 2006. *Fracture Strength of Structural Glass Elements-Analytical and Numerical Modelling*. Testing and Design. Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Hardjasaputra, H. 2010. *Struktur Transparan Dimensi Baru dalam Kontruksi Bangunan*. Seminar dan Pameran Haki 2010 "Perkembangan dan Kemajuan Konstruksi Indonesia".
- Krohn, M., H. 2002. *Biaxial Flexure Strength and Dynamic Fatigue of Soda-lime Silicate Float Glass*. Journal of American Ceramics Society, 85(7), 1777-1781.

---

\*<sup>2</sup>) Penulis korespondensi, Email: [ilham@undip.ac.id](mailto:ilham@undip.ac.id)

- Laufs, W. 2003. *Structural Use of Glass in Modern Facade Design*. Glass Processing Days Conference, Finland.
- Metro-Glasstech Catalogue. 2006. *Design Properties for Glass*. From [www.metroglasstech.co.nz](http://www.metroglasstech.co.nz).
- Norville, H. S., Morse, S. M. 2011. *Maximum Principal Stress and Probability of Breakage for Glass in Buildings*. From [www.gpd.fi](http://www.gpd.fi).
- Nurhuda, I., Lam, N. T. K., & Gad, E. F. 2008. *The Statistical Distribution on The Strength of Glass*. The 20th Australian Conference on The Mechanics of Structures and Materials, 309-315.
- Oh, S. Y., Shin, H. S., & Suh, C. M. 2003. *Evaluation of Biaxial Bending Strength in Damaged Soda-lime Glass*. International Journal of Modern Physics B, 17(8 & 9), 1329-1334.
- Overend, M., Parke, G. A. R., & Buhagiar, D. 2007. *Predicting Failure in Glass-A General Crack Growth Model*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 133(8), 1146-1155).
- Partono, W. 2012. *Bahan Ajar Mata Kuliah Mekanika Bahan*. Semarang: Teknik Sipil Universitas Diponegoro.
- Shetty, D. K., Rosenfield, A. R., Bansal, G. K., & Duckworth, W. H. 1981. *Biaxial Fracture Studies of a Glass-ceramic*. Journal of American Ceramics Society, 64(1), 1-4.
- Spiegel, M. R., Schiller, J. J., & Srinivasan, R. A. 2004. *Teori & Soal-Soal Probabilitas dan Statistik Edisi Kedua*. Jakarta: Erlangga.