

Penentuan Faktor Intensitas Tegangan Dengan Metode Kaustik

Determination of Stress Intensity Factor Using Caustic Method

Suparno^{1*}

ABSTRAK

Penentuan Faktor Intensitas Tegangan Dengan Metode Kaustik. Cahaya laser yang dilewatkan melalui ujung retakan yang terdeformasi lokal dideviasikan secara berbeda membentuk sebuah selubung permukaan yang disebut kaustik. Dilakukan penentuan faktor intensitas tegangan ragam I pada bahan bening yang retak dengan pengukuran diameter kaustik. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser He-Ne dengan daya 5 mW dan panjang gelombang 6328 Å. Dalam penerapan metode ini untuk bahan bening, perlu mengetahui besarnya koefisien tegangan optik dari bahan tersebut dengan menggunakan metode kaustik yang dipadukan dengan metode interferometri. Hasil penentuan koefisien tegangan optik dengan kaustik cahaya pantulan adalah $1,77 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ dan dengan kaustik cahaya terusan adalah $1,26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$. Hasil perhitungan Faktor Intensitas Tegangan ragam I menggunakan diameter kaustik cahaya pantulan dibandingkan dengan perhitungan secara teori terdapat perbedaan $\pm 1,96$ (4,86%), sedangkan hasil perhitungan Faktor Intensitas Tegangan ragam I menggunakan diameter kaustik cahaya terusan dibandingkan dengan perhitungan secara teori terdapat perbedaan $\pm 1,68$ (4,09%).

Kata Kunci: Kaustik, Faktor Intensitas Tegangan, Koefisien Tegangan Optik

ABSTRACT

Determination Of Stress Intensity Factor Using Caustic Method. Laser beam that is passed through a locally deformed crack tip is deviated differently forming a surface envelope called caustic. Determination of the mode I stress intensity factor at transparent material containing crack is performed with measurement of caustic diameter. The light source used is a He-Ne laser with a power of 5 mW and a wavelength of 6328 Å. In the application of this method for transparent materials, need to know the stress-optical coefficients of the materials using combination of caustic and interferometry method. Results of the stress-optical coefficient determined with reflected light caustic is $1.77 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ and determined with transmitted light caustic is $1.26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$. Calculation results of mode I Stress Intensity Factor using transversal diameter of reflected light caustic compared with the theoretical calculations varies ± 1.96 (4.86%), while the results of the calculation using transversal diameter of transmitted light caustic compared with the theoretical calculations varies $\pm 1,68$ (4.09%).

Keywords: Caustic, Stress Intensity Factor, Stress-Optical Coefficient

* email: parnomrj@batan.go.id

¹ Pusdiklat – BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya No. 9, Jakarta 12240

PENDAHULUAN

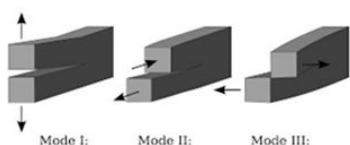
Faktor intensitas tegangan merupakan ukuran suatu bahan cacat terhadap laju terjadinya perpatahan. Bila suatu bahan retak mendapat tegangan, maka pada daerah ujung retakan terjadi pemusatan tegangan yang menyebabkan terjadinya deformasi lokal pada daerah tersebut, dan besarnya medan tegangan elastis digambarkan oleh besarnya faktor intensitas tegangan.

Dalam ilmu optik, terdapat gejala deviasi sinar-sinar cahaya karena mengalami perubahan lintasan optiknya, dan membentuk suatu sampul permukaan yang dinamakan kaustik. Perubahan lintasan optik sinar-sinar cahaya yang melalui daerah ujung retakan suatu bahan yang mendapat tegangan berkaitan dengan distribusi medan tegangan pada daerah yang terdeformasi. Dalam hal ini permukaan kaustik merupakan batas dari daerah yang terdeformasi secara elastis, dan ukurannya menggambarkan ukuran dari faktor intensitas tegangan.

Pada tulisan ini, digunakan metode kaustik dengan sinar laser untuk mengukur faktor intensitas tegangan ragam I pada bahan bening, yaitu akrilik, yang terdapat retak tepi tunggal dengan arah retakan tegak lurus arah aksialnya.

TEORI

Bila suatu bahan bening retak mendapat tegangan, maka pada ujung retakan terjadi satu atau lebih keadaan deformasi lokal, yaitu: deformasi ragam I (*opening mode*), deformasi ragam II (*in-plane-shear mode*), deformasi ragam III (*out-of-plane mode*) seperti ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1: Mode Deformasi

Besaran yang menggambarkan besarnya medan tegangan elastis yang berkaitan dengan masing-masing ragam deformasi adalah faktor intensitas tegangan. Sehubungan dengan ini, terdapat faktor intensitas tegangan ragam I (KI), ragam II (KII), dan ragam III (KIII). Bilamana tegangannya adalah tegangan bidang misalnya tegangan oleh beban tarik, maka deformasi yang ada hanya deformasi ragam I dan ragam II. Dalam sistem internasional, satuan faktor intensitas tegangan adalah $\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$.

Jumlah tegangan utama di sekeliling ujung retakan dirumuskan oleh Irwin [1] dengan persamaan:

$$(\sigma_1 + \sigma_2) = \left[K_1 \sqrt{\frac{2}{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - K_2 \sqrt{\frac{2}{\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$$K_1 = f(a/b) \sigma (\pi a)^{1/2} \sin^2 \beta \quad (2)$$

$$K_2 = f(a/b) \sigma (\pi a)^{1/2} \sin^2 \beta \cos \beta \quad (3)$$

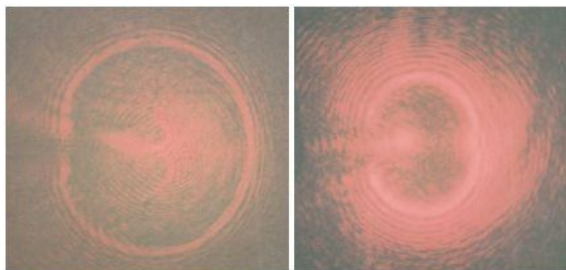
dengan

- r, θ = komponen koordinat kutub
- a = panjang retakan
- b = setengah lebar pelat
- β = sudut kemiringan retakan terhadap arah aksial
- σ = tegangan tarik
- $f(a/b)$ = faktor koreksi, untuk retak tepi tunggal disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1: Faktor Koreksi

a/b	f(a/b)
0,10	1,15
0,20	1,20
0,30	1,29
0,40	1,37
0,50	1,51
0,60	1,68
0,70	1,89
0,80	2,14
0,90	2,46
1,00	2,86

Sinar-sinar cahaya laser yang dilewatkan melalui ujung retakan yang terdeformasi, sebagian diteruskan dan sebagian dipantulkan. Sinar-sinar cahaya yang meninggalkan pelat dideviasikan secara berbeda dan terfokus pada suatu selubung permukaan yang disebut kaustik. Bentuk proyeksi kaustik pada layar yang berjarak tertentu dari benda uji adalah episikloida, yang memiliki diameter longitudinal dan diameter transversal. Kaustik yang dibentuk oleh sinar-sinar cahaya pantulan disebut kaustik pantulan, sedangkan yang dibentuk oleh sinar-sinar cahaya terusan dinamakan kaustik terusan (seperti ditunjukkan pada Gambar 2).



Gambar 2. Kaustik yang dibentuk oleh sinar laser yang melalui ujung retakan suatu bahan bening, kaustik pantulan (kiri), kaustik terusan (kanan)

Hubungan diameter episikloida dengan faktor intensitas tegangan dinyatakan dengan persamaan berikut [2]:

Hubungannya dengan kaustik pantulan

$$K_1 = \frac{1,671}{2dz_0c_r} \frac{1}{m^{3/2}} \left(\frac{D}{\delta}\right)^{5/2} \tag{4}$$

Hubungannya dengan kaustik terusan

$$K_1 = \frac{1,671}{dz_0c_t} \frac{1}{m^{3/2}} \left(\frac{D}{\delta}\right)^{5/2} \tag{5}$$

dengan

D = diameter transversal/longitudinal kaustik

δ = tetapan; nilainya 3,0 dalam hubungannya dengan diameter longitudinal, dan 3,163 dalam hubungannya dengan diameter transversal [3]

d = tebal benda uji

z_0 = jarak dari pertengahan bidang permukaan benda uji ke layar pengamatan

c_r = koefisien tegangan optik pantulan

c_t = koefisien tegangan optic terusan

m = faktor perbesaran

Besarnya koefisien tegangan optik dirumuskan, dengan persamaan berikut [4]:

$$c_r = -\frac{\lambda}{4d} \frac{N}{\sigma} \left(\frac{1}{q^{-5/2}-1}\right) \tag{6}$$

$$c_t = \frac{2c_r}{q^{5/2}} \tag{7}$$

dengan

λ = panjang gelombang sinar laser yang digunakan

$\frac{N}{\sigma}$ = jumlah frinji (*fringe*, pola gelap terang) yang dihasilkan per satuan tegangan

q = perbandingan diameter transversal kaustik pantulan dengan diameter transversal kaustik terusan, yang merupakan besaran karakteristik untuk setiap bahan

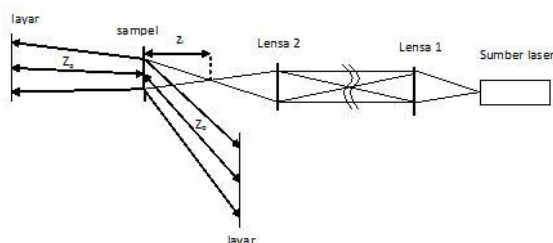
METODE PENELITIAN

Obyek yang diteliti adalah akrilik dengan tebal 0,15 cm, 0,2 cm, dan 0,3 cm. Sampel dibuat dalam bentuk empat persegi panjang dengan panjang 15 cm, dan lebar 4 cm. Sedangkan retakannya adalah retak tepi buatan yang panjangnya 1 cm dan 0,4 cm.

Prinsip pengukurannya adalah menyinari bahan yang retak dengan cahaya laser dalam kondisi mendapat tegangan, sehingga terbentuk dua kaustik yaitu kaustik pantulan dan kaustik terusan. Selanjutnya dilakukan pengukuran

terhadap diameter transversal kedua kaustik, dan hasilnya digunakan untuk menghitung besarnya faktor intensitas tegangan ragam I. Dalam pengukuran faktor intensitas tegangan perlu diketahui besarnya koefisien tegangan optik dari sampel. Oleh karena itu, maka langkah awal adalah menyinari sampel tanpa retakan dengan sinar laser dalam kondisi mendapat tegangan.

Peralatan terdiri dari sumber cahaya laser, statip, lensa positif, pemberi tegangan tarik, layar, yang disusun seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4. Sumber cahaya laser yang digunakan adalah He-Ne dengan daya 5 mW dan panjang gelombang 6328 Å. Statip berfungsi untuk mengatur posisi sumber laser sehingga arah penyinarannya sesuai dengan yang diinginkan. Lensa yang digunakan adalah lensa positif dengan panjang fokus 15 cm, lensa L₁ ditempatkan pada jarak fokusnya didepan sumber laser, sedangkan lensa L₂ diletakkan pada jarak 75 cm dari lensa L₁ dan 32 cm dari sampel. Alat pemberi tegangan tarik terdiri dari tiang penyangga, penjepit, dan beban. Beban yang digunakan berupa anak timbangan yang seluruhnya berjumlah 29 Kg. Layar digunakan untuk memproyeksikan kaustik dan frinji (*fringe*) yang dihasilkan. Ada dua layar yang digunakan, masing-masing ditempatkan pada jarak 325 cm di depan dan di belakang sampel.



Gambar 3: Diagram Peralatan Percobaan

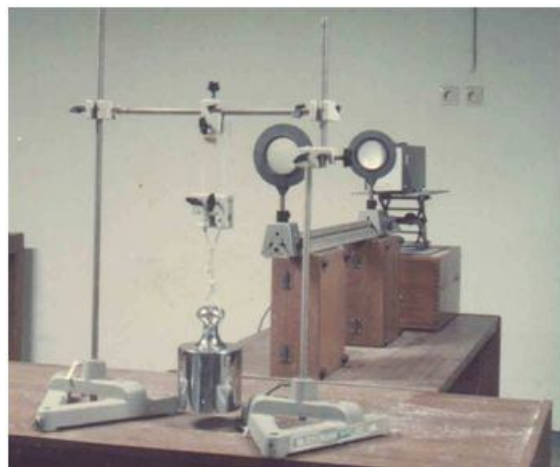
Dalam sistem peralatan pada Gambar 3, faktor perbesaran dihitung dengan persamaan [2]:

$$m = \frac{z_1+z_0}{z_1} = \frac{(32-15)+325}{(32-15)} = 20,12 \quad (8)$$

dengan

z_1 = jarak titik fokus lensa L₂ dengan sampel

z_0 = jarak sampel dengan layar

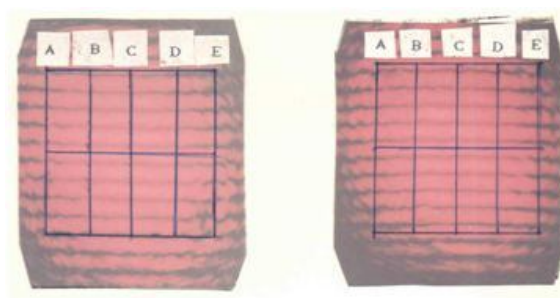


Gambar 4: Peralatan Percobaan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menentukan koefisien tegangan optik perlu melakukan pengukuran jumlah frinji per satuan tegangan tarik (N/σ) pada sampel yang tidak retak, dan pengukuran perbandingan diameter transversal kaustik pantulan dengan diameter transversal kaustik terusan (q) pada sampel yang retak.

Penyinaran sinar laser pada material tidak retak dengan tebal 0,2 cm dan lebar 4 cm yang diberi beban tarik 25,26 Kg dan 29,26 Kg menghasilkan pola frinji seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 : Frinji dari Sampel yang diberi Tegangan Tarik

Penentuan jumlah frinji dilakukan dengan membuat luasan yang sama pada kedua gambar. Pada kasus ini dibuat segiempat dengan panjang dan lebar 4 cm, serta didalamnya dibuat 3 garis, sehingga total ada 5 garis yaitu A, B, C, D, E. Selanjutnya dihitung jumlah frinji sepanjang masing-masing garis. Jumlah frinji per kilogram beban (N/M) merupakan jumlah frinji rata-rata dari jumlah frinji sepanjang garis A, B, C, D, E pada gambar 5 kanan, dikurangi jumlah frinji rata-rata dari jumlah frinji sepanjang garis A, B, C, D, E pada gambar 5 kiri, dibagi dengan selisih berat beban. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2: Hasil Pengukuran Jumlah Frinji (*Fringe*)

Garis	Jumlah Frinji (<i>Fringe</i>)	
	Gambar 5 (Kiri)	Gambar 5 (Kanan)
A	9,000	9,830
B	9,250	10,000
C	9,250	10,000
D	9,250	10,000
E	9,000	10,000
Rata-Rata	9,150	9,966

Dari Tabel 2 diperoleh Jumlah frinji per kilogram beban (N/M) untuk sampel 1, yaitu:

$$\frac{N}{M} = \frac{9,966 - 9,15}{29,26 - 25,26} = 0,204$$

Dengan cara yang sama dilakukan untuk sampel yang lain. Hasil pengukuran nilai N/M rata-rata untuk 6 sampel adalah 0,18.

Jumlah frinji per satuan tegangan tarik (N/σ) merupakan hasil kali dari jumlah frinji per kilogram beban dengan luas penampang sampel.

$$\begin{aligned} \frac{N}{\sigma} &= 0,18 \times 0,2 \times 4 \\ &= 0,144 \text{ frinji/kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Langkah selanjutnya adalah melakukan penyinaran dengan sinar laser pada ujung retakan suatu bahan retak yang diberi beban tarik, diikuti dengan pengukuran diameter transversal kaustik pantulan dan diameter transversal kaustik terusan. Kaustik yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.

Pengukuran dilakukan pada 5 variasi tebal sampel dan panjang retakan. Contoh data pengukuran diameter transversal kaustik pantulan (D_{tr}) dan diameter kaustik terusan (D_{tt}) yang diukur pada jarak 325 cm dan perbesaran 20,12 untuk tebal sampel 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm ditunjukkan pada Tabel 3. Pada Lampiran 1 dapat dilihat semua hasil pengukuran diameter kaustik.

Tabel 3: Diameter Kaustik untuk Tebal Sampel 0,15 cm dan Panjang Retakan 1 cm

Tegangan Tarik (σ) (kg/cm ²)	D_{tr} (cm)	D_{tt} (cm)	$q = D_{tr}/D_{tt}$
8,787	4,400	2,900	1,517
17,100	5,700	3,800	1,500
25,433	6,700	4,400	1,523
33,767	7,500	5,000	1,500
42,100	8,200	5,400	1,519
48,767	8,700	5,700	1,526

Perbandingan diameter transversal kaustik pantulan dengan diameter transversal kaustik terusan (q) adalah suatu tetapan yang merupakan karakteristik suatu bahan. Maka q diperoleh dari hasil rata-rata seluruh nilai q hasil percobaan yaitu 1,51.

Selanjutnya, koefisien tegangan optik diperoleh dengan memasukkan harga N/σ dan q ke Persamaan (6), dan didapatkan koefisien tegangan optik untuk cahaya pantulan adalah:

$$c_r = -\frac{6328 \times 10^{-8}}{4 \times 0,2} \times 0,144 \times \frac{1}{(1,51)^{-5/2} - 1}$$

$$= 1,77 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Sedangkan koefisien tegangan optik untuk cahaya terusan, diperoleh dari Persamaan 7 adalah:

$$c_t = \frac{2(1,77 \times 10^{-5})}{(1,51)^{5/2}}$$

$$= 1,26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Hasil percobaan tersebut sedikit berbeda dengan yang dihasilkan oleh Kartalopoulos dan Raftalopoulos [4] untuk c_r yaitu $1,68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$.

Besarnya faktor intensitas tegangan ragam I (K_I) dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 4 dan 5. Pengukuran dilakukan pada 5 variasi ketebalan dan retakan. Contoh hasil perhitungan K_I pada sampel dengan tebal 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm dinyatakan dalam Tabel 4. Pada Lampiran 2 dapat dilihat semua hasil perhitungan Faktor Intensitas Tegangan.

Tabel 4 : Hasil Perhitungan Faktor Intensitas Tegangan Pada Tebal Sampel 0,15 cm dan Panjang Retakan 1 cm

Tegangan Tarik (σ) (kg/cm ²)	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan Dtr	Perhitungan dengan Dtt	Perhitungan dengan Teori	ΔD_r (%)	ΔD_n (%)
8,767	24,490	24,260	23,460	4,390	3,140
17,100	46,770	47,770	45,770	2,180	4,370
25,433	70,060	68,800	68,070	2,920	1,070
33,766	92,890	94,700	90,370	2,790	4,790
42,100	116,100	114,800	112,680	3,040	1,880
48,766	134,620	131,400	130,520	3,140	0,670

Contoh perhitungannya adalah sebagai berikut:

Hasil pengukuran diameter transversal kaustik pantulan dan diameter transversal kaustik terusan pada jarak 325 cm dan perbesaran 20,12 untuk sampel dengan ketebalan 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm

dan mendapat tegangan tarik 8,767 kg/cm² adalah 4,4 cm dan 2,9 cm. Sedangkan pengukuran koefisien tegangan optik untuk sampel yang sama diperoleh

$$c_r = 1,77 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

$$c_t = 1,26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Besarnya faktor intensitas tegangan ragam I yang dihitung dengan diameter transversal kaustik pantulan dan diameter kaustik terusan adalah:

$$K_I = \frac{1,671}{2(0,15)(325)(20,12)^{3/2} (1,77 \times 10^{-5})} \left(\frac{4,4}{3,163} \right)^{5/2}$$

$$= 24,49 \text{ kg/cm}^{3/2}$$

$$K_I = \frac{1,671}{2(0,15)(325)(20,12)^{3/2} (1,26 \times 10^{-5})} \left(\frac{2,9}{3,163} \right)^{5/2}$$

$$= 24,26 \text{ Kg/cm}^{3/2}$$

Sebagai pembandingan, dilakukan perhitungan faktor intensitas tegangan secara teori dengan Persamaan 2 sebagai berikut:

$$K_I = 1,51 \sigma (\pi a)^{1/2}$$

$$K_I = 1,20 \sigma (\pi a)^{1/2}$$

Faktor koreksi 1,51 dan 1,20 disesuaikan dengan kondisi geometri dari eksperimen yang dilakukan. Hasil perhitungan pada sampel dengan tebal 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm dinyatakan dalam Tabel 4.

Dari seluruh hasil pengukuran, didapatkan bahwa perhitungan nilai K_I dengan diameter transversal kaustik pantulan dibandingkan dengan yang diperoleh dengan diameter kaustik terusan terdapat perbedaan rata-rata $\pm 0,28$. Sedangkan, bila dibanding dengan hasil perhitungan secara teori terdapat perbedaan masing-masing $\pm 1,96$ (4,86%) untuk perhitungan dengan diameter kaustik pantulan

dan $\pm 1,68$ (4,09%) untuk perhitungan dengan diameter kaustik terusan.

Keakuratan hasil perhitungan faktor intensitas tegangan ragam I dengan metode kaustik ini tergantung pada keakuratan dalam pengukuran koefisien tegangan optik, disamping adanya kesalahan paralaks dalam pengukuran diameter kaustik. Hasil pengukuran mungkin akan lebih akurat bila dalam pengukuran jumlah frinji digunakan alat pencacah frinji.

KESIMPULAN

Hasil penentuan Faktor Intensitas Tegangan ragam I dengan metode kaustik sinar laser dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil penentuan koefisien tegangan optik bahan akrilik adalah:

$$c_r = 1,77 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

$$c_t = 1,26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Bila dibanding dengan hasil yang diperoleh Kartalopoulos dan Raftalopoulos [4] terdapat keseksamaan 94,6%.

2. Pengukuran Faktor Intensitas Tegangan ragam I dengan menggunakan diameter kaustik transversal cahaya pantulan (D_{tr}) dan diameter kaustik transversal cahaya terusan (D_{tt}) didapatkan hasil yang tidak jauh berbeda (perbedaan $\pm 0,28$).

3. Hasil perhitungan Faktor Intensitas Tegangan ragam I menggunakan diameter kaustik cahaya pantulan dibandingkan dengan perhitungan secara teori terdapat perbedaan $\pm 1,96$ (4,86%)

4. Hasil perhitungan Faktor Intensitas Tegangan ragam I menggunakan diameter kaustik cahaya terusan dibandingkan dengan perhitungan secara teori terdapat perbedaan $\pm 1,68$ (4,09%)

5. Diameter transversal kaustik cahaya pantulan selalu lebih besar daripada diameter transversal kaustik cahaya terusan bila diukur pada jarak dan tegangan tarik yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. S. Theocaris and E. Gdoulos, "An Optical Method for Opening Mode and Edge-Sliding Mode Stress Intensity Factors," *Journal Applied Mechanics*, vol. 39, p. 91, 1972.
- [2] P. S. Theocaris, "Local Yielding Around a Crack Tip in Plexiglass," *Journal Applied Mechanics*, vol. 37, p. 409, 1970.
- [3] F. S. Theocaris, "Reflected Shadow Method for the Study of Constrained Zones in Cracked Plates," *Journal Applied Optic*, vol. 10, p. 2240, 1971.
- [4] D. D. Raftopoulos and S. V. Kartalopoulos, "Evaluation of Stress-Optical Coefficients of Transparent Solid Plates Using Interferometry," *Journal Applied Optic*, vol. 18, p. 2975, 1979.
- [5] Ares J. Rosakis, Alan T. Zehnder, and Maratnam Narasimhan, "Caustic by Reflection and Their Application to Elastic Plastic and Dynamic Fracture Mechanics," *Optical Engineering*, vol. 27, p. 596, 1968.
- [6] Kevin L. Dickerson and Kyung S. Kins, "Blunt Crack Caustic," *Optical Engineering*, vol. 27, p. 611, 1988.

LAMPIRAN I

Hasil Pengukuran Diameter Transversal Kaustik Cahaya Pantulan dan Kausik Cahaya Terusan dan Nilai Perbandingannya

Tabel 3-A: Diameter kaustik untuk tebal sampel 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik (σ) kg/cm ²	D _{tr} (cm)	D _{tt} (cm)	q = D _{tr} /D _{tt}
8,787	4,4	2,9	1,517
17,1	5,7	3,8	1,5
25,433	6,7	4,4	1,523
33,767	7,5	5,0	1,5
42,1	8,2	5,4	1,509
48,767	8,7	5,7	1,526

Tabel 3-B: Diameter kaustik untuk tebal sampel 0,15 cm dan panjang retakan 0,4 cm

Tegangan Tarik (σ) kg/cm ²	D _{tr} (cm)	D _{tt} (cm)	q = D _{tr} /D _{tt}
8,787	3,4	2,2	1,54
17,1	4,4	2,9	1,517
25,433	5,2	3,4	1,529
33,767	5,8	3,8	1,526
42,1	6,2	4,1	1,512
48,767	6,6	4,4	1,5

Tabel 3-C: Diameter kaustik untuk tebal sampel 0,20 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik (σ) kg/cm ²	D _{tr} (cm)	D _{tt} (cm)	q = D _{tr} /D _{tt}
6,575	4,4	2,9	1,517
12,825	5,8	3,8	1,526
19,075	6,8	4,5	1,511
25,325	7,5	5,0	1,5
31,575	8,2	5,4	1,519
36,575	8,7	5,7	1,526

Tabel 3-D: Diameter kaustik untuk tebal sampel 0,20 cm dan panjang retakan 0,4 cm

Tegangan Tarik (σ) kg/cm ²	D _{tr} (cm)	D _{tt} (cm)	q = D _{tr} /D _{tt}
6,575	3,3	2,2	1,426
12,825	4,4	2,9	1,517
19,075	5,3	3,4	1,514
25,325	5,9	3,8	1,513
31,575	6,3	4,1	1,5
36,575	6,7	4,4	1,488

Tabel 3-E: Diameter kaustik untuk tebal sampel 0,3 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik (σ) kg/cm ²	D _{tr} (cm)	D _{tt} (cm)	q = D _{tr} /D _{tt}
4,383	4,3	2,9	1,482
8,55	5,8	3,8	1,526
12,716	6,8	4,5	1,511
16,88	7,6	5,0	1,501
21,05	8,2	5,4	1,518
24,383	8,8	5,8	1,517

LAMPIRAN II
Hasil Perhitungan Faktor Intensitas Tegangan Ragam I

Tabel 4-A: Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada tebal sampel 0,15 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik σ kg/cm ²	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan D_{tr}	Perhitungan dengan D_{tt}	Perhitungan dengan Teori	ΔD_{tr} (%)	ΔD_{tt} (%)
8,767	24,49	24,26	23,46	4,39	3,14
17,100	46,77	47,77	45,77	2,18	4,37
25,433	70,06	68,8	68,07	2,92	1,07
33,766	92,89	94,7	90,37	2,79	4,79
42,100	116,1	114,8	112,68	3,04	1,88
48,766	134,62	131,4	130,52	3,14	0,67

Tabel 4-B: Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada tebal sampel 0,15 cm dan panjang retakan 0,4 cm

Tegangan Tarik σ kg/cm ²	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan D_{tr}	Perhitungan dengan D_{tt}	Perhitungan dengan Teori	ΔD_{tr} (%)	ΔD_{tt} (%)
8,767	12,85	12,85	11,79	8,99	8,99
17,100	24,48	24,48	23,00	6,43	6,43
25,433	37,18	36,11	34,21	8,68	5,55
33,766	48,85	47,69	45,42	7,55	5,00
42,100	57,71	57,66	56,63	1,91	1,82
48,766	67,47	68,70	65,60	2,85	4,73

Tabel 4-C: Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada tebal sampel 0,2 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik σ kg/cm ²	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan D_{tr}	Perhitungan dengan D_{tt}	Perhitungan dengan Teori	ΔD_{tr} (%)	ΔD_{tt} (%)
6,575	18,24	18,19	17,59	3,70	3,41
12,825	36,39	35,76	34,32	6,03	4,20
19,075	52,20	54,58	51,05	2,25	6,91
25,325	69,30	71,03	67,78	2,24	4,79
31,575	86,50	86,09	84,51	2,35	1,87
36,575	98,29	98,56	97,89	0,41	0,68

Tabel 4-D: Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada tebal sampel 0,2 cm dan panjang retakan 0,4 cm

Tegangan Tarik σ kg/cm ²	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan D_{tr}	Perhitungan dengan D_{tt}	Perhitungan dengan Teori	ΔD_{tr} (%)	ΔD_{tt} (%)
6,575	9,58	9,12	8,84	8,37	3,17
12,825	18,24	18,20	17,25	5,74	5,51
19,075	29,05	27,08	25,66	13,21	5,53
25,325	37,98	35,77	34,07	11,48	4,99
31,575	44,75	43,25	42,47	5,37	1,84
36,575	51,20	51,59	49,20	4,07	4,86

Tabel 4-E: Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada tebal sampel 0,3 cm dan panjang retakan 1 cm

Tegangan Tarik σ kg/cm ²	Faktor Intensitas Tegangan (kg/cm ^{3/2})			Perbedaan Hasil Perhitungan Terhadap Teori	
	Perhitungan dengan D_{tr}	Perhitungan dengan D_{tt}	Perhitungan dengan Teori	ΔD_{tr} (%)	ΔD_{tt} (%)
4,383	11,48	12,13	11,73	-2,13	3,41
8,55	24,26	23,84	22,88	6,03	4,20
12,716	36,11	36,38	34,03	6,11	6,91
16,88	47,27	47,35	45,18	4,63	4,80
21,05	59,44	57,40	56,33	5,52	1,90
24,383	68,80	68,62	65,26	5,42	5,15