

**KAJI KUALITATIF POLA TEGANGAN DENGAN VARIASI GEOMETRI DAN
BEBAN PADA BAJA MENGGUNAKAN METODE LAPISAN GETAS
(BRITTLE COATINGS METHOD)**

Darto*

Abstrak

Metode lapisan getas (*brittle coating method*) yang termasuk dalam teori elastisitas dapat digunakan untuk menganalisa tegangan secara teliti. Akan tetapi bentuk geometri dan jenis pembebanan yang tidak umum akan menimbulkan kesulitan dalam penyelesaian persamaan matematisnya. Sehingga metode teoritis ini hanya berguna untuk bentuk dan pembebanan yang sederhana. Dengan metode ini diharapkan distribusi dan kondisi tegangan yang sebenarnya akan dapat diketahui sehingga akibat pembebanan pada elemen dalam kondisi operasinya dapat diperhitungkan dengan lebih pasti.

Dalam penelitian ini menggunakan metode diskriptif yaitu menjelaskan secara kualitatif serta didukung dengan beberapa data yaitu data teoritis dan data actual. Berdasarkan percobaan yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa specimen dengan geometri yang penuh dengan konsentrasi tegangan mengalami retakan yang berbentuk acak sedangkan specimen dengan bentuk geometri campuran antara konsentrasi tegangan dan distribusi tegangan yang merata mengalami retakan primer dan sekunder dan specimen dengan bentuk distribusi tegangan yang merata mengalami retakan primer.

Kata kunci : lapisan getas, retakan, tegangan, regangan

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Dalam Teknik Mesin sering dijumpai berbagai masalah perencanaan maupun perencanaan kembali suatu elemen atau struktur, baik perencanaan elemen mesin maupun struktur batang. Perencanaan harus memperhatikan masalah yang berkaitan dengan kekuatan terhadap pembebanan disamping kemampuan fungsionalnya.

Teori elastisitas mungkin dapat digunakan untuk menganalisa tegangan dengan tepat. Tetapi bentuk geometri dan jenis pembebanan yang tidak umum akan menimbulkan kesulitan dalam penyelesaian persamaan matematisnya, sehingga metode teoritis ini hanya berguna untuk bentuk dan pembebanan yang sederhana. Metode ini bisa digunakan pada saat membuat sebuah prototipe dari sebuah produk misalnya perencanaan pemukul valve yang mendapat pembebanan kantilever sehingga saat pengujian tidak perlu merusak spesimen (Non Destructive Test). Untuk mengatasi kesulitan penyelesaian masalah diatas, maka dianjurkan untuk menggunakan analisa tegangan eksperimental. Berdasarkan masalah diatas penulis ingin meneliti sejauh mana keakuratan data yang mampu diberikan oleh metode lapisan getas.

Permasalahan

Permasalahan yang muncul dari penelitian ini adalah apakah dengan metode lapisan getas dapat memberikan data yang akurat dalam proses menganalisa tegangan yang terjadi pada specimen dengan bentuk yang bervariasi.

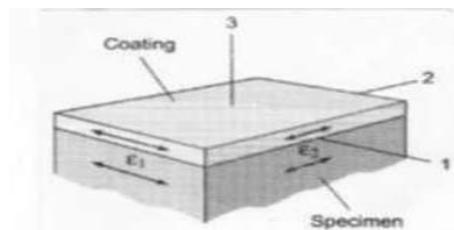
* Dosen Jurusan Mesin Fak. Teknik Univ. Merdeka Malang

Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah mengetahui lokasi yang mengalami keretakan pada daerah dengan beban maksimum dan mendapatkan bentuk (alur atau pola) keretakan pada masing – masing specimen dengan bentuk geometri yang berbeda. Di samping itu dengan metode ini diharapkan distribusi dan kondisi tegangan yang sebenarnya akan dapat diketahui, sehingga akibat pembebanan pada elemen suatu sistem dalam kondisi operasinya dapat diperhitungkan dengan lebih pasti.

KAJIAN PUSTAKA

Disemua teori kegagalan lapisan, diasumsikan bahwa tegangan yang diberikan pada bahan (specimen) adalah sama dengan tegangan yang diterima oleh lapisan getas (Gambar 1).

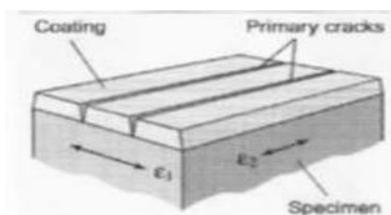


Gambar 1. Regangan Pada Lapisan Dan Spesimen

$$e_1^c = e_1^s = e_1, e_2^c = e_2^s = e_2 \dots \dots \dots (1)$$

dimana : ϵ_1^c = Regangan utama maksimum pada lapisan getas ($\mu\text{m/m}$); ϵ_2^c = Regangan utama minimum pada lapisan getas ($\mu\text{m/m}$); ϵ_1^s = Regangan utama maksimum pada spesimen ($\mu\text{m/m}$); ϵ_2^s = Regangan utama minimum pada spesimen ($\mu\text{m/m}$)

Retakan primer dan sekunder pada lapisan dapat terjadi saat spesimen diberikan beban, pada saat pembebanan terjadi hanya retakan primer yang diamati, seperti diilustrasikan pada gambar 2. Retakan primer arahnya tegak lurus regangan utama maksimum ϵ_1 , sedangkan retakan sekunder (apabila terjadi) arahnya tegak lurus dengan regangan utama minimum ϵ_2 .



Gambar 2. Retakan Primer Pada Lapisan Getas.

$$\frac{S_1^s}{E^s} \geq \left(e_{t^*} \right) \dots \dots \dots (2)$$

dimana : σ_1^s = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm^2); E^s = Modulus elastisitas lapisan getas (kg/cm^2); ϵ_t^* = Regangan utama maksimum ($\mu\text{m/m}$)

Isoentatics adalah akhir dari ujung retakan yang terjadi pada lapisan yang dibebani nilai P_i , dimana subscript i adalah simbol besarnya beban yang diberikan.

Teori Tegangan Normal Maksimum Pada Lapisan

Menurut teori ini, lapisan akan retak ketika tegangan normal maksimum pada lapisan (S_1^c) mencapai titik kritis. Hubungan antara lapisan dan tegangan diberikan oleh:

$$S_1^c = \frac{E^c}{1-(\nu^c)^2} (\epsilon_1 + \nu^c \epsilon_2) \dots\dots\dots(3)$$

dimana : σ_1^c = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm²); E^c = Modulus elastisitas lapisan getas (kg/cm²); ν^c = poisson rasio untuk lapisan getas; ϵ_1 = Regangan utama maksimum (µm/m); ϵ_2 = Regangan utama minimum (µm/m)

Elemen n^c menunjukkan perbandingan angka poisson terhadap material lapisan. Langkah selanjutnya menghubungkan komponen regangan ϵ_1 dan ϵ_2 terhadap regangan pada spesimen.

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E^s} (\sigma_1^s - \nu^s \sigma_2^s), \epsilon_2 = \frac{1}{E^s} (\sigma_2^s - \nu^s \sigma_1^s) \dots\dots\dots(4)$$

dimana : σ_1^s = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm²); σ_2^s = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm²); E^s = Modulus elastisitas lapisan getas (kg/cm²); ν^s = poisson rasio untuk material spesimen.

Substitusi persamaan tegangan pada spesimen (4) dihubungkan dengan persamaan (3) pada lapisan sehingga menghasilkan

$$S_1^c = \frac{E^c}{E^s(1-(\nu^c)^2)} [(1-n^c \nu^s) \sigma_1^s + (\nu^c - n^s) \sigma_2^s],$$

$$S_2^c = \frac{E^c}{E^s(1-(\nu^c)^2)} [(1-n^c \nu^s) \sigma_2^s + (\nu^c - n^s) \sigma_1^s]. \dots\dots\dots(5)$$

Teori Tegangan Normal Maksimum pada Spesimen

Menurut teori tegangan normal maksimum pada spesimen (Dally dan Riley 1991), nilai tegangan normal maksimum pada spesimen dengan isoentatics secara sederhana diambil dari

$$\sigma_1^s = E^s \epsilon_t^* \dots\dots\dots(6)$$

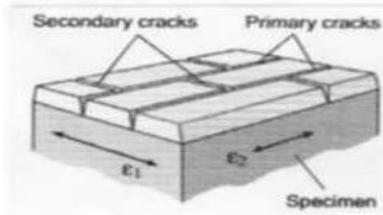
dimana : σ_1^s = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm²); E^s = Modulus elastisitas lapisan getas (kg/cm²); ϵ_t^* = Regangan utama maksimum (µm/m)

Retakan Sekunder

Ketika kedua tegangan normal utama yang direncanakan bernilai positif dan dapat dibandingkan dengan

$$0 < S_2^s < S_1^s,$$

Maka retakan sekunder dapat saja terjadi, retakan sekunder ini membentuk garis tegak lurus pada retakan primer yang sudah ada, dan berakhir pada retakan primer, seperti diilustrasikan pada gambar 3.



Gambar 3. Retakan Primer Dan Sekunder.

Pada umumnya, nilai S_2^s paling tidak setengah dari S_1^s jika retakan sekunder terbentuk sebelum tegangan normal yang menyebabkan terjadinya retakan primer mencapai tegangan lulur (yield) lapisan.

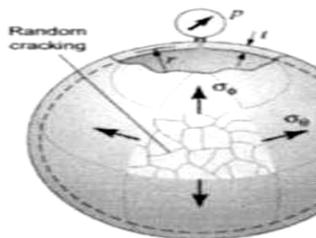
Batas tegangan retakan sekunder lebih besar dari yang dibutuhkan untuk terjadinya retakan primer yang akhirnya berpengaruh pada tegangan yang diterima oleh lapisan dan karenanya meningkatkan batas tegangan yang menyebabkan retakan primer

$$\frac{S_2^s}{E^s} \geq \left(e_t^* \right)_2 \text{ untuk retakan sekunder.} \dots\dots\dots(7)$$

Retakan Acak

Tipe retakan acak selalu dibutuhkan karena nantinya diharapkan pengujian sesuai dengan keadaan sebenarnya. Retakan acak dapat juga terjadi bila tegangan berada ditempat yang sama dengan retakan biaxial pada akhirnya mencapai keadaan dimana $0 < S_2^s = S_1^s$, dan disini lebih cenderung terjadi retakan kearah sembarang, hal ini terjadi pada saat $S_2^s = S_1^s = E^s e_t^*$

Sebagai contoh pada dinding silinder yang menghasilkan retakan acak akibat dari tegangan seperti gambar berikut



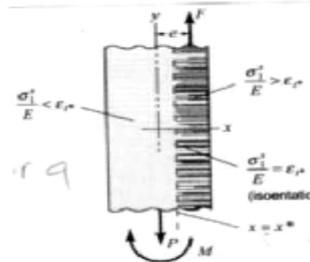
Gambar 4. Tekanan Pada Silinder Yang Menyebabkan Retakan Acak

Ploting Distribusi Tegangan

Sebuah ilustrasi distribusi tekanan pada komponen dibutuhkan. Karena data isoentatics diambil dari nilai yang berbeda pada tiap – tiap pembebanan. Normalisasi memungkinkan perbandingan dengan kalkulasi teoritikal. Sebagai contoh, pertimbangan pembebanan eksentrik sepanjang bidang pada tegangan. Masalah ini diilustrasikan lebih jelas dalam gambar 5. Sehingga didapat persamaan berikut

$$S_y = \frac{P}{A} + \frac{Mx}{I} = \frac{F}{bh} + \frac{eFx}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{F}{bh} \left(1 + \frac{12ex}{h^2} \right) \dots\dots\dots(8)$$

dimana : σ_y = Tegangan yield spesimen (kg/cm²); P = Beban (kg); A = Luasan (cm²); I = Momen inersia (kg.cm²); F = Gaya (Newton); b = Lebar (cm); h = Tebal (cm)

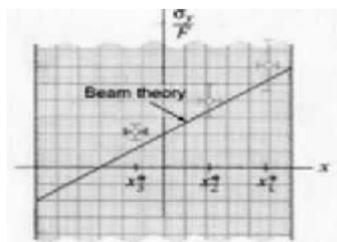


Gambar 5. Free Body Diagram Prediksi Lokasi Keretakan Dan Isoentatik.

Jika tekanan ini dinormalkan dengan hati-hati pada aplikasi pembebanan F, sehingga pers (2.8) menjadi

$$\frac{S_y}{F} = \frac{1}{bh} \left(1 + \frac{12ex}{h^2} \right) = f(x) \dots\dots\dots(9)$$

Hubungan sebuah fungsi dari posisi x tidak bergantung pada F. Hubungan ini ditampilkan sebuah garis lurus pada gambar 6. Data isoentatics dapat dibandingkan langsung dengan hasil teori ini, dengan mengkalkulasi nilai dari σ_y/F berdasarkan pada asumsi kriteria kegagalan pelapisan.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Lapisan Getas Dengan Prediksi Teoritik.

Pada percobaan ini, isoentatics dinilai pada lokasi posisi $x_1^s, x_2^s, x_3^s, \dots\dots\dots$, sesuai dengan pembebanan F_1, F_2, F_3, \dots dst

$$S_y = S_1^s = E^s e_t^s$$

Karenanya secara eksperimen pada pola isoentatics, dapat dianalisa dengan persamaan berikut

$$\frac{S_y}{F} = \frac{E^s e_t^*}{F_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \dots \dots (10)$$

HASIL PENELITIAN

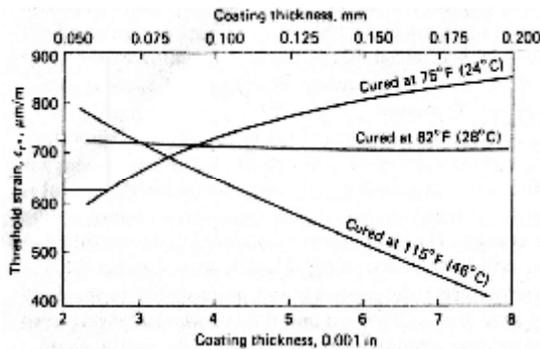
Data – data saat melakukan penelitian

1. Tebal lapisan Getas : 0.006 (mm)
2. Temperatur Pengujian : 24 °C
3. Kelembaban Rata – rata : 28 %

Teori Tegangan Normal Maksimum pada Spesimen

$$S_1^s = E^s e_t^*$$

dimana : S_1^s = Tegangan normal maksimum pada spesimen (kg/cm²); e_t^* = Batas regangan lapisan getas (µm/m); E^s = Modulus elastisitas spesimen (psi)



Gambar 7. Grafik Hubungan Tebal Lapisan Dengan Batas Regangan Lapisan.

Tabel 1. Konstanta Fisik Logam.

Material	Modulus of elasticity E, psi	Modulus of rigidity G, psi	Poisson's ratio ν	Density δ, lb/in. ³
Aluminum alloy	10.3 × 10 ⁶	3.85 × 10 ⁶	0.33	0.10
Beryllium	42 × 10 ⁶	0.066
Beryllium copper	18 × 10 ⁶	7 × 10 ⁶	0.29	0.30
Brass, bronze	16 × 10 ⁶	6 × 10 ⁶	0.34	0.30
Magnesium alloy	6.5 × 10 ⁶	2.4 × 10 ⁶	0.35	0.065
Nickel alloy	30 × 10 ⁶	11 × 10 ⁶	0.30	0.30
Steel, carbon and alloy	29.5 × 10 ⁶	11.4 × 10 ⁶	0.30	0.28
Steel, stainless	28 × 10 ⁶	10.6 × 10 ⁶	0.31	0.28
Titanium alloy	16 × 10 ⁶	6.2 × 10 ⁶	0.33	0.16
Zinc, die-cast alloy	2 × 10 ⁶	...	0.33	0.24

Maka besar tegangan pada spesimen I,

$$S_1^s = E^s e_t^* = \{(29,5 \times 10^6 (psi)) \cdot 625 (mm / m)\} = 12961,56 (kg / cm^2)$$

Hasil pengamatan spesimen melibatkan dua komponen tegangan pada spesimen, maka perlu dibuat asumsi bahwa

$$S_2^s = \frac{1}{2} S_1^s = \frac{1}{2} 129615,63 = 6480,78 (kg / cm^2)$$

Regangan maksimum yang arahnya tegak lurus dengan retakan primer besarnya

$$e_1 = \frac{1}{E^s} (S_1^s - \nu^s S_2^s) = \frac{1}{(2073850 (kg / cm^2))} (12961,56 - (0,30 \times 6480,78)) (kg / cm^2) = 0,040 (mm)$$

Regangan minimum yang arahnya tegak lurus dengan retakan sekunder besarnya

$$e_2 = \frac{1}{E^s} (S_2^s - \nu^s S_1^s) = \frac{1}{(2073850 (kg / cm^2))} (6480,78 - (0,30 \times 12961,56)) (kg / cm^2) = 0,009 (mm)$$

Tegangan Normal Maksimum Pada Lapisan

$$\begin{aligned} S_1^c &= \frac{E^c}{E^s (1 - (n^c)^2)} [(1 - n^c n^s) S_1^s + (n^c - n^s) S_2^s] \\ &= \frac{35,15 (kg / cm^2)}{2073850 (kg / cm^2) (1 - (0,43)^2)} [(1 - (0,43 \times 0,30)) 12961,56 + (0,43 - 0,30) 6480,78] (kg / cm^2) \\ &= 0,617 (kg / cm^2) \end{aligned}$$

Tegangan Normal Minimum Pada Lapisan

$$\begin{aligned} S_2^c &= \frac{E^c}{E^s (1 - (n^c)^2)} [(1 - n^c n^s) S_2^s + (n^c - n^s) S_1^s] \\ &= \frac{35,15 (kg / cm^2)}{2073850 (kg / cm^2) (1 - (0,43)^2)} [(1 - (0,43 \times 0,30)) 6480,78 + (0,43 - 0,30) 12961,56] (kg / cm^2) \\ &= 0,135 (kg / cm^2) \end{aligned}$$

Dimana :

S_1^c = Tegangan normal maksimum pada lapisan getas (kg/cm^2); S_2^c = Tegangan normal minimum pada lapisan getas (kg/cm^2); S_1^s = Tegangan normal maksimum pada spesimen (kg/cm^2); S_2^s = Tegangan normal minimum pada spesimen (kg/cm^2); E^c = Modulus elastisitas lapisan getas (kg/cm^2); E^s = Modulus elastisitas spesimen (kg/cm^2); ν^c = Angka rasio poisson lapisan getas

ν^s = Angka rasio poisson spesimen

Berdasarkan hal tersebut diatas, maka besar tegangan yang mampu meretakkan lapisan getas, untuk jenis retakan :

Retakan Primer

$$\frac{S_1^s}{E^s} \geq \left(e_t^* \right)_1; \frac{12961,563(kg/cm^2)}{2073850(kg/cm^2)} \geq (625(mm/m))_1; 0,006 \geq 625(mm/m)$$

Retakan Sekunder

$$\frac{S_2^s}{E^s} \geq \left(e_t^* \right)_2; \frac{6480,78(kg/cm^2)}{2073850(kg/cm^2)} \geq (625(mm/m))_2; 0,003 \geq 625(mm/m)$$

Retakan Acak

$$S_2^s = S_1^s = E^s e_t^* = 2073850(kg/cm^2) \times 625(mm/m) = 12961,56(kg/cm^2)$$

Ploting Distribusi Tegangan

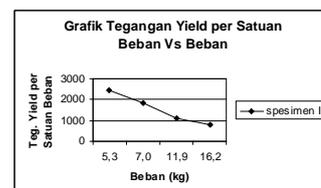
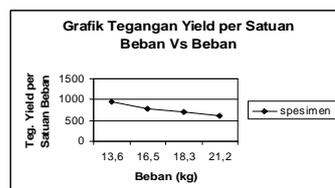
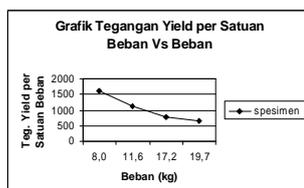
Pada spesimen I dengan beban yang menyebabkan keretakan awal sebesar 8 (kg) maka besar rasio

$$\frac{S_y}{F} = \frac{E^s e_t^*}{F_1} = \frac{2073850(kg/cm^2) \times 625(mm/m)}{8(kg)} = 1620,19(kg/cm^2)$$

Dengan cara yang serupa maka didapat variabel penelitian untuk spesimen yang lain, hal tersebut dapat dilihat dari tabel berikut :

Tabel 2. Tabel Tegangan Yield dibagi Beban Berdasarkan Asumsi Kriteria Kegagalan.

$\frac{S_y}{F}$	Spesimen I				Spesimen II				Spesimen III			
	F ₁ = 8 (kg)	F ₂ = 11.6 (kg)	F ₃ = 17.2 (kg)	F ₄ = 19.7 (kg)	F ₁ = 13.6 (kg)	F ₂ = 16.5 (kg)	F ₃ = 18.3 (kg)	F ₄ = 21.2 (kg)	F ₁ = 5.3 (kg)	F ₂ = 7 (kg)	F ₃ = 11.9 (kg)	F ₄ = 16.2 (kg)
$\frac{S_y}{F}$ (kg/cm ²)	1620.19	1117.38	753.58	657.95	953.06	785.55	708.28	611.39	2445.58	1851.65	1089.21	800.09



Gambar 8. Grafik Hubungan Tegangan Yield Per Satuan Beban (Kg/Cm²) Dengan Beban (Kg)

Plotting Pola Retakan.

Spesimen I

Spesimen II

Spesimen III



Retakan yang terjadi pada spesimen I ini mengalami retakan primer dan retakan sekunder tidak terjadi hal ini dikarenakan tegangan normal maksimum primer pada spesimen lebih besar daripada tegangan normal maksimum sekunder pada spesimen. Pada spesimen II terdapat sedikit retakan sekunder karena disini tegangan normal sekunder maksimum pada spesimen nilainya bertambah hal ini disebabkan karena geometri dari spesimen yang berbentuk lingkaran. Spesimen III mengalami kecenderungan retakan acak disebabkan oleh geometri spesimen yang mengalami konsentrasi tegangan dan akhirnya berakibat pada terbentuknya retakan acak.

ANALISIS HASIL PENELITIAN

Pengujian dengan metode lapisan getas ini dimaksudkan untuk mendapatkan pola tegangan apabila sebuah benda mendapatkan beban dan gaya dari luar. Semua data yang dihasilkan dengan metode lapisan getas ini hasilnya dapat bervariasi hal ini dipengaruhi oleh batas regangan maksimum lapisan getas (ϵ_t^*) karena semakin besar nilainya maka sensitifitas lapisan getas terhadap tegangan yang diterima akan semakin menurun.

Pada saat penelitian dengan metode lapisan getas juga perlu dibuat sebuah asumsi bahwa regangan yang dialami oleh spesimen (ϵ_1^s) adalah sama dengan regangan yang terjadi pada lapisan getas (ϵ_1^c) dan tegangan normal minimum (σ_2^s) besarnya setengah dari tegangan normal maksimum (σ_1^s).

Ketiga grafik hubungan tegangan yield per satuan beban dengan beban menunjukkan bahwa semuanya berbanding lurus dengan beban yang artinya semakin besar beban yang diberikan maka akan menurunkan nilai tegangan yield per satuan bebannya (σ_y/F)

Berdasarkan pola retakan yang terjadi pada spesimen I hanya mengalami retakan primer, disini tidak terjadi retakan sekunder dan retakan acak karena faktor geometri spesimen yang mempunyai radius. Untuk spesimen II mengalami retakan primer dan sekunder sedangkan retakan acak tidak terjadi disini, retakan sekunder muncul karena geometri spesimen yang berbentuk lingkaran pada saat ditarik dengan beban tertentu geometrinya akan berubah menjadi hampir menjadi sebuah garis lurus inilah yang menyebabkan terjadinya retakan sekunder. Sedangkan pada spesimen III yang terjadi justru retakan acak dikarenakan konsentrasi tegangan yang terjadi menyebabkan tegangan normal minimum (σ_2^s) besarnya sama dengan tegangan normal maksimum (σ_1^s).

Dari hasil pengujian ini diketahui bahwa untuk spesimen III keretakan awal terjadi pada beban 5,3 (kg) disebabkan oleh konsentrasi tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen I dan Spesimen II hal ini dibuktikan pada grafik tegangan yield per satuan beban vs beban, dari grafik dapat dilihat bahwa nilai σ_y/F maksimum mencapai 2445,58 (kg/cm^2), sehingga menimbulkan keretakan acak sedangkan untuk spesimen I dan II dari grafik dapat dibaca bahwa kedua spesimen ini dapat menahan beban yang lebih besar dan nilai σ_y/F maksimum lebih kecil daripada σ_y/F maksimum spesimen III.

SIMPULAN

Dari hasil penelitian dengan menggunakan lapisan getas didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengujian dengan metode lapisan getas ini dapat diterapkan untuk pembebanan sederhana seperti tarik, tekan serta puntir karena data yang dihasilkan cukup akurat.
2. Spesimen I mengalami retakan primer, spesimen II mengalami retakan primer dan sekunder sedangkan spesimen III mengalami retakan acak.
3. Spesimen III awal retaknya lapisan getas terjadi pada beban yang lebih kecil dibandingkan Spesimen I dan II karena faktor konsentrasi tegangan.
4. Kecenderungan nilai tegangan yield berbanding terbalik dengan beban.

DAFTAR PUSTAKA

- B. Ranganayakamma., V. Dayal., dan D. V. S. Sarma,(1976). *Main Landing Gear Testing by Photoelastic Coating*, ADE Bangalore report.
- Dally, J. W., dan W. F. Riley, (1991) *Experimental Stress Analysis*, 3rd Edition. New York : McGraw-Hill.
- Durelli, A. J., E. A. Phillips, dan C. H. Tsao, (1958) *Introduction to the Theoretical and Experimental of Stress and Strain*, New York : McGraw-Hill.
- G. R. Terry, *Experimental Stress Analysis*, www.engr.wisc.edu/ep/ema/course
- J. F. Doyle, *Modern Experimental Stress Analysis : Completing the Solution of Partially Specified Problems*, www.engineering.purdue.edu/AAE.
- J.W.Phillips, *Brittle Coatings*, www.iptek.net.id/experimentalstressanalysis/pdf
- Laboratory InformationPage, *Experimental Stress Analysis*, www.personal.psu.
- Takeshi, Sato. G dan Sugiarto Hartanto, N, (1989). *Menggambar Mesin Menurut Standar ISO*, Cetakan ke-4. Jakarta: PT. Pradnya Paramita. 1989.
- V. N. Drew, *Fatigue&Experimental Mechanic*, www.chemindustry.entola.com